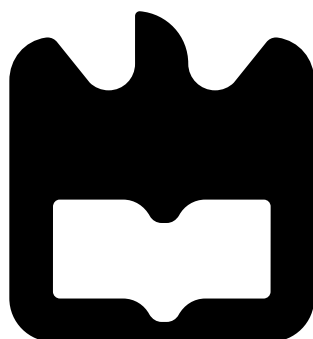




Marco André
da Silva Granada

Transmissão de energia por sinais óticos.





**Marco André
da Silva Granada**

Transmissão de energia por sinais óticos.

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Física, realizada sob a orientação científica do Prof. Paulo André, Professor do Departamento de Física da Universidade de Aveiro e investigador auxiliar do IT e co-orientação científica do Prof. Mário Lima, Professor do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

o júri

Presidente

Prof. Doutor João Filipe Calapez de Albuquerque Veloso

Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

Vogal - Arguente

Doutor Orlando José dos Reis Frazão

Investigador Auxiliar, Inesc-Porto

Vogal - Orientador

Doutor Paulo Sérgio de Brito André

Professor Auxiliar Convidado Com Agregação, Universidade de Aveiro e Investigador Auxiliar, IT

Vogal - Co-Orientador

Prof. Doutor Mário José Neves de Lima

Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Gostaria de começar por agradecer aos meus orientadores por toda a ajuda a mim prestada durante a realização deste trabalho, que não foi nada pouca. Queria também agradecer à minha mãe por ter acreditado sempre em mim, mesmo quando eu deixei de o fazer. Queria também agradecer a todos os meus familiares e amigos que sempre me ajudaram, apoiaram e motivaram durante este penoso processo. E em especial à minha irmã porque ela é espetacular!

palavras-chave

Transmissão de Energia, Redes Óticas, Meios Atmosféricos Turbulentos, Amplificação Raman.

Resumo

Atualmente, é comum a transição das tecnologias baseadas na eletrônica para as baseadas na ótica. Neste trabalho foi estudado o limite de aplicação e demonstrada a aplicabilidade de transmissão de energia através de um sinal ótico. Foi estudada a transmissão de energia em espaço livre tendo-se simulado a propagação em ambiente turbulento. Foi também demonstrada a possibilidade de reciclagem de um sinal ótico de amplificação Raman de uma rede de fibra ótica. Por fim projetou-se um monitor do coeficiente de estrutura do índice de refração.

keywords

Energy Transmission, Optical Networks, Turbulent Atmosphere, Raman Amplification.

Abstract

Currently, it is common the transition of electronic-based technologies to optical-based. In this paper we studied the application limits and demonstrated the applicability of power transmission by an optical signal. We studied the transmission of energy in free space having simulated the propagation in a turbulent environment. It's also demonstrated the recycling of an optical signal pump for Raman amplification in a fiber optic network. Finally, it was designed a monitor for the refractive index structure coefficient.

Conteúdo

Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	v
1 Introdução	1
1.1 Introdução e Motivação	1
1.2 Estado da Arte	3
1.3 Objetivos	4
1.4 Principais Contribuições	4
2 Fundamentos Teóricos	5
2.1 Conversão eletro-ótica	5
2.2 Meio de Transmissão do sinal ótico	5
2.2.1 Fibra ótica	5
2.2.2 Espaço livre	6
2.3 Conversão Fotovoltaica	11
3 Implementação do Sistema com Propagação em Espaço Livre	13
3.1 Caracterização de Células Fotovoltaicas	13
3.2 Resultados	15
3.3 Simulação do meio de transmissão	16
3.4 Conclusões	32
4 Propagação em Fibra	35
4.1 Funcionamento de amplificação Raman	35
4.2 Caracterização do Conversor Opto-eletrônico	35
4.3 Reciclagem da potência do sinal de bombeamento	36
4.4 Conclusões	39
5 Desenvolvimento de um Monitor para o Coeficiente de Estrutura do Índice Refrativo	41
5.1 Implementação	41
5.2 Resultados	42
5.3 Conclusões	46
6 Conclusões e trabalho futuro	47
Referências	49

Lista de Figuras

1.1	Cotação do cobre ao longo dos últimos 3 anos no mercado Londrino.	1
1.2	Ilustração da alimentação de um UAV por um laser terrestre.	2
1.3	Esquema simplificado de uma rede PON.	3
2.1	Atenuação típica para a sílica utilizadas no fabrico de fibras óticas.	6
3.1	Fotografia das células fotovoltaicas utilizadas neste trabalho.	13
3.2	Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.	14
3.3	Esquema do sistema utilizado no laboratório de ótica orgânica para caracterizações IV de células fotovoltaicas.	15
3.4	Esquema do sistema implementado para estudar as curva IV das células solares comerciais com luz solar direta.	15
3.5	Curva IV para as células fotovoltaicas consideradas obtida no laboratório de ótica orgânica.	16
3.6	Curvas IV para as células fotovoltaicas estudadas.	17
3.7	Esquema das células fotovoltaicas utilizadas.	19
3.8	Esquema da célula fotovoltaica simulada.	19
3.9	Variância da intensidade do sinal ótico para valores típicos da constante de estrutura do índice de refração em função da distância de propagação.	20
3.10	Variância do deslocamento do sinal ótico para valores típicos da constante de estrutura do índice de refração função da distância de propagação.	21
3.11	Eficiência das células em função do raio do feixe ótico circular homogêneo. . .	21
3.12	Eficiência das células em função da largura do feixe ótico circular gaussiano. .	22
3.13	Eficiência da célula 1 para diferentes valores de C_n	23
3.14	Eficiência da célula 2 para diferentes valores de C_n	24
3.15	Eficiência da célula 3 para diferentes valores de C_n	25
3.16	Eficiência da célula 1 na presença de nevoeiro.	25
3.17	Eficiência da célula 2 na presença de nevoeiro.	26
3.18	Eficiência da célula 3 na presença de nevoeiro.	26
3.19	Eficiência da célula 1 na presença de chuva.	27
3.20	Eficiência da célula 2 na presença de chuva.	27
3.21	Eficiência da célula 3 na presença de chuva.	28
3.22	Eficiência da célula 1 para diferentes alargamentos dos feixes com $C_n = 4 \times 10^{-8}$. .	29
3.23	Eficiência da célula 2 para diferentes alargamentos dos feixes com $C_n = 4 \times 10^{-8}$. .	29
3.24	Eficiência da célula 3 para diferentes alargamentos dos feixes com $C_n = 4 \times 10^{-8}$. .	30
3.25	Eficiência da célula 1 para diferentes alargamentos dos feixes para uma distância de 200 m.	30
3.26	Eficiência da célula 2 para diferentes alargamentos dos feixes para uma distância de 200 m.	31
3.27	Eficiência da célula 3 para diferentes alargamentos dos feixes para uma distância de 200 m.	31
4.1	Fotografias do PPC utilizado.	36
4.2	Gráficos dos resultados obtidos para o PPC.	36
4.3	Esquema do sistema utilizado para demonstrar a reciclagem da energia do sinal de bombeamento Raman.	37

4.4	Espetro ótico na entrada da fibra ótica.	37
4.5	Ganho ligado/desligado obtido através da amplificação Raman.	38
4.6	Diagrama de olho do sinal após saída no OSA.	38
5.1	Esquema do sensor desenvolvido para determinar o coeficiente de estrutura do índice de refração.	42
5.2	Exemplo de imagem obtida com o detetor.	42
5.3	Perfil do feixe segundo o eixo horizontal e ajuste gaussiano.	43
5.4	Perfil do feixe segundo o eixo vertical e ajuste gaussiano.	44
5.5	Distribuição dos pontos centrais obtidos através do ajuste gaussiano.	44
5.6	Evolução do desvio padrão estimado da posição do feixe em função do número de amostras e para diversos níveis de turbulência.	45
5.7	Evolução de coeficiente estrutural do índice de refração em função do nível da turbulência induzida.	46

Lista de Tabelas

2.1	Parâmetros de p_i	8
2.2	Parâmetros k e β para a atenuação da chuva.	8
3.1	Parâmetros das células solares utilizadas.	13
3.2	Parâmetros de ajuste das células solares.	16
3.3	Características das células fotovoltaicas.	17
3.4	Parâmetros obtidos por simulação para obter a eficiência máxima das células 1, 2 e 3.	22
5.1	Valores esperados para σ_r	41

1 Introdução

1.1 Introdução e Motivação

Desde o período pré-histórico que os seres humanos tentam dominar a luz, primeiro com a descoberta do fogo, e posteriormente (na antiguidade clássica) com a invenção do espelho e do vidro [1]. Entre o período do iluminismo e a era moderna foram sendo descobertas as propriedades espectrais, eletromagnéticas e ondulatórias dos sinais óticos. Foi nesse último período que também se reportou a existência de uma componente do espectro eletromagnético invisível ao olho humano. Essa gama espectral estende-se nos comprimentos de onda superiores ao vermelho (designado como infravermelho) e nos comprimentos de onda inferiores ao violeta (designado como ultravioleta). Por sua vez a fibra de vidro, utilizada para a condução de sinais óticos, foi inventada no início do século XX [2].

Atualmente, os termos como “eficiência energética” e “pegada ecológica” aparecem no nosso dia a dia, sendo continuamente divulgados nos media e veem a sua importância na sociedade incrementando. Mesmo no atual cenário de crise financeira uma larga fração da população continua a preferir sistemas que, mesmo mais dispendiosos, deixam uma menor pegada ecológica ou que possuindo uma maior eficiência energética acabam por compensar economicamente a longo prazo o investimento inicial. Apesar das fontes de energia e os equipamentos eletrônicos terminais sofrerem uma grande divulgação, a questão relacionada com o transporte de energia não tem o mesmo destaque, sendo no entanto um processo potencialmente dispendioso, ineficiente e ambientalmente nocivo. Com a transmissão de energia elétrica através de cabos de cobre, é necessário considerar o incremental furto de cabos de cobre que regularmente são reportados na comunicação social. Estes furtos surgem devido ao valor que o cobre tem enquanto metal, ver figura 1.1, e a facilidade da posterior venda para sucata.



Figura 1.1: Cotação do cobre ao longo dos últimos 3 anos no mercado Londrino. Tendo o seu preço no mercado de Nova Iorque e Xangai sofrido flutuações semelhantes [3].

De uma forma geral as tecnologias baseadas em ótica têm várias vantagens em relação às baseadas em eletrônica, sendo de destacar a imunidade à interferência eletromagnética (EM). São vários os exemplos onde impulsos EM resultaram na destruição de aparelhos eletrônicos, como no caso do projeto Starfish em 1962 onde a detonação de um engenho nuclear provocou a destruição do sistema de iluminação pública no Havai, aproximadamente a 1445 quilômetros de distância da explosão [4]. Assim, cada vez mais diversos setores industriais, destacando a indústria militar, procuram soluções baseadas em sensores e sistemas óticos [5].

Um tópico que envolve as indústrias militares, aeronáuticas, de telecomunicações e a comunidade científica, reside na alimentação energética de veículos aéreos não tripulados (UAV, em inglês *unmanned aerial vehicle*). Desta forma, os UAV dispensando a utilização de baterias pesadas, ficam mais leves e sem dependerem da luz solar para a sua operação [6]. Na Figura 1.2 ilustra-se a alimentação de um UAV, através de um laser terrestre. O UAV inicia a missão com as baterias carregadas de energia, que vai sendo consumida durante a missão. Quando o nível de carga chega a um valor crítico o UAV volta para uma região onde será recarregado em pleno voo. Após ter as baterias recarregadas o UAV voltará para a sua missão reiniciando o ciclo.

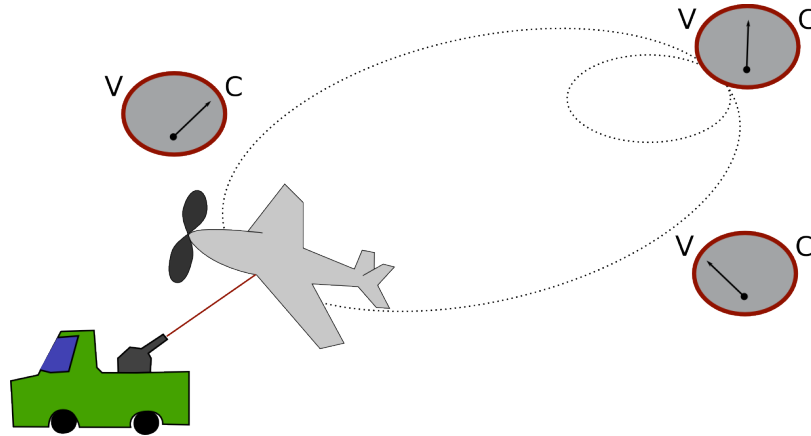


Figura 1.2: Ilustração da alimentação de um UAV por um laser terrestre.

Como pode ser alimentado através de um sinal ótico, este UAV não necessita de luz solar podendo operar durante a noite ou com tempo nublado.

Outro aspeto onde a alimentação energética é essencial reside na expansão das redes óticas passivas (PON, do inglês *Passive Optical Network*), que torna necessária a implementação de sistemas de monitorização da rede e de comutação nos nós remotos (NR). Na figura 1.3 encontra-se o esquema básico de funcionamento de uma rede ótica passiva em que entre o sistema central (EC) e os recetores finais (RFs) se encontram os nós remotos onde é feita a divisão do sinal ótico pelos vários RFs.

Para alimentar eletricamente os sistemas de monitorização colocados nos NR pode ser utilizada a rede elétrica, no entanto, isso iria eliminar uma das principais vantagens dos sistemas PON. Poderia também ser utilizada uma bateria química de Lítio com uma duração de aproximadamente 20 anos, mas esta solução não agrada a todos os operadores, que preferem manter o sistema sem recorrer a baterias químicas [7]. Por estes motivos a utilização de dispositivos de monitorização alimentados por energia proveniente de um sinal ótico é vantajoso [5, 7–9].

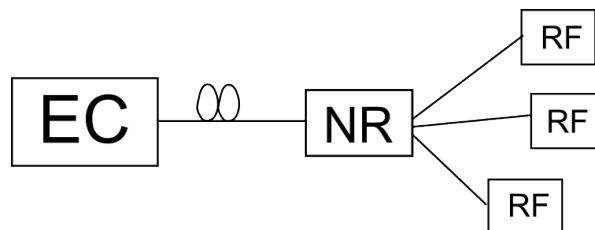


Figura 1.3: Esquema simplificado de uma rede PON, em que as ligação entre o sistema central (EC) e os recetores finais (RF) são realizadas por um nó remoto.

Uma das formas de utilizar os sistemas designados como PoF (do inglês *Power over Fiber*) consiste em reciclar a potência do sinal de bombeamento usada na amplificação Raman do sinal de comunicação, para gerar energia elétrica no NR [10, 11].

1.2 Estado da Arte

Em 2003 investigadores da NASA, no Marshall Space Flight Center, criaram um protótipo de um UAV, controlado por um sinal de radiofrequência e alimentado por um laser a emitir na região do infravermelho, que voou dentro de um pavilhão fechado. No entanto, este protótipo era muito leve e não foi capaz de voar no exterior devido ao vento [12]. Posteriormente, uma equipa da empresa LaserMotive conseguiu alimentar um robot com um feixe laser, tendo este subido um cabo preso a um helicóptero, chegando a uma altura de 1000 m. Esta companhia conseguiu ainda, com um sistema idêntico, elevar um helicóptero e mantê-lo no ar. O helicóptero, com um massa de 22 gramas, acabou por cair passado algumas horas devido a uma falha do motor [13].

Se em relação aos sistemas de transmissão de energia por espaço livre tem havido uma baixa disseminação, a transmissão através de fibra ótica tem um elevado potencial de disseminação. Tal deve-se ao facto de os sistemas de comunicação ótica são utilizados nas comunicações devido a vários fatores, nomeadamente a baixa atenuação da fibra em comparação com outros meios, a baixa complexidade dos sistemas opto-eletrónicos, o baixo custo e o elevado ritmo de transmissão que pode proporcionar. No entanto, a sua implementação é difícil quando utilizados em locais remotos devido à alimentação elétrica. Mas, ao fornecer energia para alimentar esses sistemas através da fibra ótica elimina a necessidade de cabos de alimentação adicionais, tornando esta tecnologia viável mesmo em locais remotos [14–16].

Outra questão relevante reside no facto dos telefones tradicionais terem uma fonte de alimentação própria, através do cabo de cobre usado para as comunicações para ser possível comunicar no caso de uma quebra de energia da rede elétrica no local do utilizador. No entanto, com a expansão das comunicações óticas e a massificação dos sistemas VoIP (voz sobre IP, do inglês *Voice over IP*), a energia elétrica já não pode ser transmitida diretamente para o telefone mas mantém-se o problema da quebra de energia da rede no local do utilizador e a necessidade de manter a comunicação por voz para situações de emergência. Assim, a transmissão de energia por fibra ótica pode ser utilizada para manter as comunicações ativas e resolver este problema [9]. Mais ainda, tendo em consideração que cada vez mais sensores opto-eletrónicos são utilizados em lugares remotos, e que nestes sistemas a fibra ótica é utilizada para transmitir os seus dados, esta fibra ótica pode ser também utilizada para a alimentação energética dos sensores [17].

1.3 Objetivos

O presente trabalho teve como principal objetivo o estudo da transmissão de energia elétrica através de sinais óticos. Tendo como foco a propagação em espaço livre, principalmente na presença de meios turbulentos. Foi também demonstrada a utilização num sistema em fibra ótica com amplificação Raman, onde se mostrará como a reciclagem da energia do sinal de bombeamento possibilita a alimentação de sistemas de monitorização.

1.4 Principais Contribuições

Este trabalho deu origem à seguinte contribuição:

- P.S. André, M. J. N. Lima, A. M. Rocha, N. Fernandes, M. Granada, T. Almeida, Jin Chan Rao Lan, and Xin Xiang-Jun. Raman amplified access networks with pump signal recycling for electrical power conversion. *Microwave and Optical Technology Letters*, 54(1):116-119, 2012.

2 Fundamentos Teóricos

Os objetivos propostos para esta dissertação requerem a utilização de diversos fundamentos teóricos, os quais serão descritos nesta secção.

Um sistema de transmissão de energia através de um sinal ótico pode ser dividido em três blocos fundamentais. Inicialmente, é necessário converter a energia elétrica em ótica, seguidamente o sinal é transmitido através de um meio de propagação e finalmente é realizada a conversão do sinal ótico para um sinal elétrico.

2.1 Conversão eletro-ótica

Como já mencionado anteriormente, para transmitir energia através de um sinal ótico é necessário antes de mais converter um sinal elétrico para o domínio do ótico. Para realizar esta função podem ser utilizados lasers ou díodos emissores de luz (LED, do inglês *Light Emitting Diode*).

Embora existam diversos tipos de lasers, todos eles possuem três blocos fundamentais:

- i)* meio ativo, ou seja, um meio que possa ser excitado para emitir radiação ótica na frequência pretendida;
- ii)* uma cavidade ressonante, que tem como objetivo aumentar o comprimento efetivo pelo meio ativo para aumentar a amplificação do sinal e promover a seletividade espectral;
- iii)* uma fonte de bombeamento de energia capaz de excitar os átomos do meio ativo para um nível de energia que possa ser utilizado na emissão estimulada.

A emissão deste tipo de dispositivos caracteriza-se por ser coerente, colimada, monocromática e com uma estreita largura espectral de emissão. No entanto alguns lasers emitem sinais com elevadas larguras espectrais [2]. Os lasers comerciais existentes atualmente costumam ter eficiências entre 0.001 % a 30 % [18]. No entanto, já foram reportados laser de GaAs, com comprimento de onda de emissão de 850 nm, cuja eficiência atinge 57 % [19].

Ao contrário da emissão laser, a emissão do LED não é coerente, não é colimada e geralmente possui uma maior largura espectral [2]. Estes aspetos tornam este tipo de dispositivo menos interessante para a transmissão de energia por sinal ótico que o laser.

2.2 Meio de Transmissão do sinal ótico

2.2.1 Fibra ótica

Outro aspeto que é necessário ter em conta quando se pretende transmitir energia através de um sinal ótico prende-se com o meio de transmissão, nomeadamente, as variações espaciais

a que está sujeita e a atenuação que se verifica durante a sua propagação.

A fibra ótica é um meio de propagação muito estável e controlado, que permite a propagação de sinais óticos com atenuação reduzida para uma região espectral centrado em 1550 nm. A atenuação do sinal na fibra ótica são induzidas essencialmente pelos fenómenos de absorção, espalhamento e micro/macro curvaturas, que resulta no desvio do sinal ótico da região do núcleo para a região da bainha.

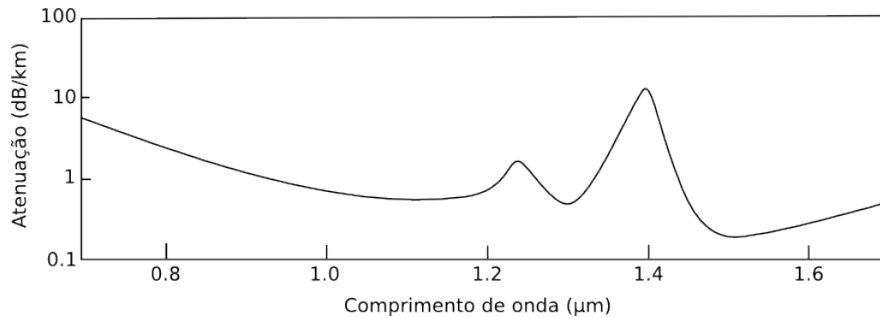


Figura 2.1: Atenuação típica para a sílica utilizadas no fabrico de fibras óticas. O valor mínimo de atenuação situa-se em torno de 1550 nm, e tem um valor típico de 0.18 dB/km [20].

Além dos aspetos já mencionados, o acoplamento entre o laser e a fibra ótica e entre a fibra ótica e o foto-detetor impõe uma atenuação adicional, designada como perda de acoplamento. Este tipo de perdas pode ser evitado ou bastante reduzido através do desenho adequado do acoplamento e da correta limpeza dos acopladores e pontas das fibras.

Quando se pretende utilizar fibra ótica para transmitir sinais óticos de elevada potência é necessário ter em consideração a intensidade máxima do sinal que pode ser injetada na fibra, é aproximadamente 10 GW/cm². Sabendo que as fibras monomodo comerciais têm um núcleo com aproximadamente 10 μm de diâmetro, é possível injetar um sinal com uma potência ótica de aproximadamente 7 kW. Para comparação a intensidade máxima recomendada para o cobre é de 200 kW/cm².

Quando o limite de intensidade é atingido, a fibra irá sofrer destruição catastrófica, nomeadamente, através da fusão do seu núcleo [21].

2.2.2 Espaço livre

A propagação de um sinal ótico num meio como a atmosfera não pode ser tão controlada como acontece com a propagação na fibra ótica. Nestes meios à atenuação devido à absorção é ainda acrescentada a atenuação resultante do processo de cintilação e do deslocamento do feixe ótico. A cintilação consiste na deformação do feixe ótico provocada pela turbulência atmosférica com um domínio espacial inferior ou próximo do diâmetro do feixe ótico e a deslocação do feixe é provocada pela turbulência atmosférica com um domínios espacial cujo diâmetro é superior ao diâmetro do feixe ótico. A turbulência atmosférica pode ter várias origens mas, a mais comum acontece devido à alteração de temperatura local.

A atenuação na atmosfera depende ainda de outros fatores, tais como, a absorção e o espalhamento. Estes mecanismos dependem do tipo e da concentração de moléculas e de aerossóis presentes na atmosfera. A intensidade do sinal ótico, I_L , num recetor a uma distância L do emissor é descrito pela lei de Beer-Lambert:

$$I_L = I_0 e^{-\alpha L} \quad (2.1)$$

onde I_0 é a intensidade inicial e α é o coeficiente de atenuação. Sendo este coeficiente de atenuação fortemente dependente das condições atmosféricas e do comprimento de onda do sinal, de tal forma que se pode formular:

$$I_L = I_0 e^{-(\alpha_m + \beta_m + \alpha_a + \beta_a)L} \quad (2.2)$$

em que α representa a absorção, β representa o espalhamento e os índices m e a representam respetivamente a componente molecular e de aerossol. Considerando que a transmitância é dada por:

$$T = \frac{I_L}{I_0} \quad (2.3)$$

Assim, a partir da transmitância é possível obter o coeficiente de atenuação para a atmosfera. Os intervalos espectrais para os quais existe uma elevada transmitância são designados como janelas de transmissão atmosférica. Sendo usualmente utilizada a janela I que corresponde ao intervalo espectral compreendido entre 720 - 940 nm. Neste trabalho considera-se a atenuação (α) como tendo o valor $0.126 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$, para um ambiente sem poluição ao nível do mar para a janela I [22].

Na presença de nevoeiro, no modelo previsto em [23], o coeficiente de atenuação é maioritariamente dependente do espalhamento de Mie provocado pelas partículas de humidade presentes na atmosfera. Assim o coeficiente de atenuação é dado por:

$$\alpha = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{550 \text{ nm}} \right)^{-q} \quad (2.4)$$

sendo V a visibilidade expressa em quilómetros, e q um parâmetro da distribuição de partículas. No entanto, mais recentemente um outro modelo foi descrito na referência [24]. Neste modelo existe uma relação entre o raio efetivo das partículas de água, r_e , e a atenuação do sinal e é dada por:

$$\alpha(\lambda) = \alpha(0.55 \mu\text{m}) \left(\frac{\lambda}{0.55 \mu\text{m}} \right)^s \quad (2.5)$$

sendo $\alpha(0.55 \mu\text{m}) = -\ln(0.02)/V$, e sendo s a função do declive da dependência log-log entre o comprimento de onda e o coeficiente de extinção e é aproximada como:

$$s = 2(\tanh(p_1(w + p_4)) - 1) + p_2 \exp(-p_3(w + p_5)^2) \quad (2.6)$$

em que $w = \log_{10} r_e$. Este modelo considera ainda que o raio efetivo das partículas de humidade é dado por:

$$r_e = r_{e0} \left(\frac{V_0}{V} \right)^{1/c-1} \quad (2.7)$$

e fazendo as seguintes considerações, utilizando valores de observações experimentais, $c = 2/3$, $r_{e0} = 10 \mu\text{m}$ e $V_0 = 0.05 \text{ km}$, a equação (2.7) é reescrita:

$$r_e = 10 \left(\frac{0.05}{V} \right)^{1/2} \quad (2.8)$$

Na referência [24] definem-se dois intervalos para o parâmetro p_i , da função s , dependendo do comprimento de onda:

i) $200 \text{ nm} < \lambda < 550 \text{ nm}$;

ii) $550 \text{ nm} \leq \lambda < 2000 \text{ nm}$.

Os parâmetros de p_i para ambos os intervalos encontram-se na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Parâmetros de p_i [24].

p_i	$200 \text{ nm} < \lambda < 550 \text{ nm}$	$550 \text{ nm} \leq \lambda < 2000 \text{ nm}$
p_1	2.22	1.94
p_2	0.67	0.59
p_3	8.05	6.37
p_4	0.80	0.45
p_5	0.30	-0.15

Para calcular a atenuação resultante da chuva recorreu-se ao ITU (do inglês *International Telecommunication Union*) através da sua recomendação ITU.R-REC-P.1814 [25]. Esta recomendação foi feita para sistemas de comunicações óticos em espaço aberto, no entanto a expressão para a atenuação da chuva é independente da sua aplicação e dada por:

$$\alpha = kR^\beta \quad (2.9)$$

em que R é a precipitação da chuva em mm/h, e k e β são parâmetros obtidos através de medições experimentais e dependem do tipo de chuva. Nesta expressão α vem expresso em dB/km pelo que é necessário fazer a sua conversão para m^{-1} para a utilização na equação (2.1). Nesta recomendação são dados dois valores distintos obtidos em duas localizações diferentes. Esses parâmetros podem ser observados na tabela 2.2.

Tabela 2.2: Parâmetros k e β para a atenuação da chuva.

Localização	k	β
França	1.580	0.63
Japão	1.076	0.67

Neste trabalho serão utilizados os parâmetros de França devido à sua maior proximidade geográfica.

Os fenómenos de cintilação e deslocamento do feixe dependem do índice de refração no meio, n , que é normalmente uma função aleatória no tempo e espaço, dada por:

$$n(\vec{r}) = n_0 + \delta n(\vec{r}); \quad (2.10)$$

em que n_0 representa o valor médio de $n(\vec{r})$, medido num período de tempo, τ , muito maior que o tempo de vida da perturbação, desta forma:

$$\langle n(\vec{r}) \rangle = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau n(\vec{r}, t) dt \quad (2.11)$$

assim, $\langle [\langle n(\vec{r}) \rangle] \rangle = \langle n(\vec{r}) \rangle$ e $\langle \delta n(\vec{r}) \rangle = 0$. A flutuação do índice de refração, em torno de um valor médio, $\delta n(\vec{r})$, é proporcional à flutuação da densidade de ar, $\delta N(\vec{r})$, que por sua vez depende da temperatura. Assim, utilizando a lei de Lorenz-Lorentz [26]:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = NC_1 \quad (2.12)$$

onde N é a densidade molecular do meio e C_1 é uma constante dependente do comprimento de onda do sinal. Para a atmosfera, onde $n \simeq 1$, a eq. (2.12) pode ser aproximada a:

$$n - 1 = \frac{3}{2} NC_1 \quad (2.13)$$

diferenciando a eq.(2.13) obtemos a relação entre δn e δN :

$$\delta n = \frac{3}{2} C_1 \delta N \quad (2.14)$$

Admitindo que os gases que constituem a atmosfera se portam como gases ideais, pode-se utilizar a relação $N = p/k_B T$, em que p é a pressão. Considerando a região espectral de interesse o fator constante $3C_1/2k_B$ é dado, aproximadamente, por $79 \times 10^{-6} K/mbar$:

$$n - 1 = 79 \times 10^{-6} p/T \quad (2.15)$$

Assim pode-se relacionar o índice de refração com a pressão e a temperatura do ar. No entanto, pode-se considerar que a variação da pressão é reduzida, sendo rapidamente dispersa, e que as flutuações de temperatura podem ser tratadas como um processo adiabático. Nesta situação:

$$pT^{\gamma/(1-\gamma)} = \text{constante} \quad (2.16)$$

com o índice adiabático, γ , aproximadamente igual a 1.4 para o ar. Através da diferenciação da eq.(2.16) obtém-se:

$$\frac{\delta p}{p} = \left(\frac{\gamma}{\gamma - 1} \right) \frac{\delta T}{T} \quad (2.17)$$

Utilizando a diferenciação da eq. (2.15) pode-se eliminar δp na eq. (2.17) e ficar com:

$$\delta n = \left(\frac{79 \times 10^{-6}}{\gamma - 1} \right) \frac{p}{T^2} \delta T \quad (2.18)$$

Estas flutuações de temperatura são provocadas por fenómenos de larga escala, como resultado do aquecimento da superfície terrestre ou o cisalhamento do vento. Assim, existirão domínios de turbulência, cujo diâmetro se situa entre a dimensão designada como exterior, L_0 , e a dimensão designada como interior, l_0 . Quando é injetada energia que induz turbulência, numa dada região, essa região é limitada por L_0 , sendo l_0 o tamanho da região de turbulência quando começa a dissipação da energia da turbulência em calor. Tanto l_0 como L_0 dependem de vários fatores, nomeadamente da temperatura, pressão, humidade e velocidade do vento [26].

Outro parâmetro importante para qualificar a turbulência atmosférica é o coeficiente de estrutura do índice refrativo, C_n . Este parâmetro relaciona a pressão e a temperatura entre dois pontos separados por uma distância, r :

$$C_n = \left[79 \times 10^{-6} \frac{p}{T^2} \right] \times C_T \quad (2.19)$$

ao parâmetro C_T dá-se a designação de parâmetro estrutural da temperatura, sendo dado por:

$$C_T = \sqrt{\langle (T_1 - T_2)^2 \rangle} r^{-1/3} \quad (2.20)$$

onde T_1 e T_2 são os valores de temperatura medidos em dois pontos, separados por uma distância, r , quantificadas em Kelvin [27]. O valor típico de C_n para [28]:

- i) turbulência forte é de $5 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1/3}$;
- ii) para a turbulência intermédia é de $4 \times 10^{-8} \text{ m}^{-1/3}$;
- iii) e para a turbulência fraca é de $8 \times 10^{-9} \text{ m}^{-1/3}$.

Existem vários tipos de perturbações que podem ser provocados pela turbulência atmosférica, no entanto, no âmbito deste trabalho será apenas considerado o deslocamento do feixe do sinal ótico e a cintilação. O efeito de deslocamento do feixe deve-se à presença de domínios de turbulência, cujo raio é superior à dimensão do feixe ótico, e que se comportam como lentes que deslocam o feixe da sua posição. A variância radial do deslocamento do feixe, utilizando uma aproximação de ótica geométrica, é dada por:

$$\sigma_r^2 = 1,83 C_n^2 \lambda^{-1/6} L^{17/6} \quad (2.21)$$

onde λ é o comprimento de onda do sinal ótico e L é a distância percorrida [26].

A cintilação deve-se à passagem do feixe laser por domínios de turbulência cujo raio do domínio é inferior à dimensão do feixe ótico. Quando isto acontece o perfil espacial do feixe é alterado, deixando de ser um perfil gaussiano. Ao contrário do deslocamento do feixe, que pode ser estudado através da ótica geométrica, a cintilação deve-se à turbulência induzida por domínios com raio inferior ao raio do feixe ótico o que provoca o aparecimento do fenómeno de difração. Assim, na maior parte dos casos, não é possível utilizar uma aproximação de ótica geométrica para a cintilação. Um parâmetro importante para analisar a cintilação é o designado logaritmo da intensidade instantânea,

$$i(t) = \ln [I(t) / \langle I \rangle] \quad (2.22)$$

sendo $I(t)$ a intensidade instantânea no instante t , e $\langle I \rangle$ o valor médio da intensidade. Para percursos horizontais e ondas planas, a variância de $i(t)$, é dada por:

$$\sigma_{i(t)}^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (2.23)$$

com k , a constante de propagação, dada por $2\pi/\lambda$ [26]. No entanto, experimentalmente observa-se que a variância de $i(t)$ satura quando os valores de C_n ou L são muito elevados, dependendo das condições experimentais [29].

2.3 Conversão Fotovoltaica

O conversor fotovoltaico (PPC, do inglês *Photovoltaic Power Converter*) é o dispositivo responsável por converter o sinal ótico em elétrico. Neste trabalho a eficiência deste dispositivo tem uma importância vital. Usualmente, são produzidos com base em semicondutores inorgânicos ou orgânicos [30]. A potência elétrica máxima, P_{mt} , de um dispositivo deste tipo é dada por:

$$P_{mt} = I_{cc} \times V_{ca} \quad (2.24)$$

onde I_{cc} é a corrente em curto circuito e V_{ca} é a tensão em circuito aberto, obtidas quando no dispositivo incide um sinal ótico. No entanto, esse valor não é alcançável experimentalmente, assim define-se o fator de preenchimento (FF , do inglês *fill factor*), dado por:

$$FF = \frac{P_{me}}{P_{mt}} \quad (2.25)$$

onde P_{me} é a potência elétrica máxima efetiva. Sendo que a eficiência máxima de conversão, η_m , é dada por:

$$\eta_m = \frac{P_{mt}}{P} \quad (2.26)$$

onde P é a potência ótica incidente. Para além destes parâmetros, podemos ainda considerar a eficiência quântica de conversão, η_q , que corresponde à eficiência de conversão de fótons em elétrons, dada por:

$$\eta_q = \frac{n^\circ \text{elétrons/s}}{n^\circ \text{fótons/s}} \quad (2.27)$$

O número de fótons é dado pelo rácio entre a potência ótica incidente e a energia de cada fóton, assim:

$$\eta_q = \frac{I/e}{P/(hc/\lambda)} = \frac{hcI}{P\lambda e} \quad (2.28)$$

onde h é a constante de Plank, c a velocidade da luz no vázio, λ o comprimento do sinal ótico e I a corrente gerada.

Quando se pretende extrair energia de uma fonte ótica através de uma célula fotovoltaica é preciso ter em consideração que o processo pelo qual se gera energia elétrica prende-se com a passagem de elétrons da banda de valência para a banda de condução. Para isso é necessário que a energia de cada fóton seja suficiente para passar este hiato de energia. No entanto, quando a energia de um fóton é superior à energia de hiato o seu excesso de energia também será desperdiçado. Assim sendo é importante utilizar uma fonte que emita no comprimento de onda otimizado para a célula fotovoltaica.

3 Implementação do Sistema com Propagação em Espaço Livre

3.1 Caracterização de Células Fotovoltaicas

Um dos elementos mais importantes no contexto de transmissão de energia através de sinal ótico é o conversor fotovoltaico. As células fotovoltaicas consideradas são divididas em sub-células eletricamente isoladas, interligadas em série ou em paralelo. Esta ligação permite aumentar a tensão e/ou corrente elétrica de saída. Neste trabalho foram utilizadas duas células fotovoltaicas distintas, com área e número de sub-células diferentes. As células designadas como 1 e 2 possuem as características descritas na tabela 3.1 e estão ilustradas na fotografia da figura 3.1 [31].

Tabela 3.1: Parâmetros das células solares utilizadas.

	Número de células	Dimensão (cm ²)
célula 1	11	$9,0 \times 3,2$
célula 2	9	4×6

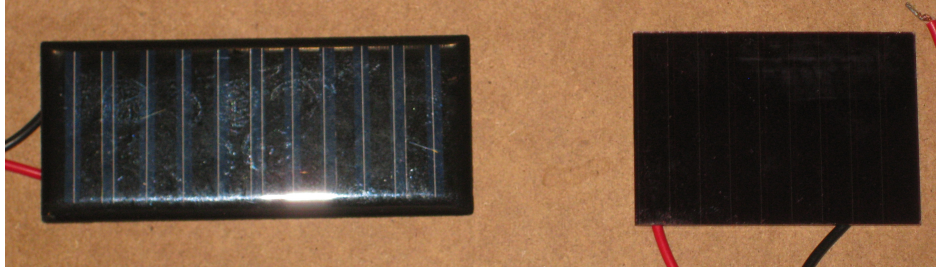


Figura 3.1: Fotografia das células fotovoltaicas utilizadas neste trabalho. Do lado esquerdo está a célula 1 e do lado direito a célula 2.

Uma célula fotovoltaica pode ser descrita como um circuito equivalente a uma fonte de corrente (I_f), em paralelo com um díodo (I_0) e uma resistência (R_P), estando este conjunto em série com uma resistência de saída (R_S). O esquema do circuito equivalente pode ser visto na figura 3.2.

Deste circuito equivalente resulta que o valor da corrente, I , obtida com uma tensão de saída, V , é dado por:

$$I = I_f - I_0 \left[e^{\left(\frac{V + R_S I}{m V_T} \right)} - 1 \right] - \frac{V + R_S I}{R_P} \quad (3.1)$$

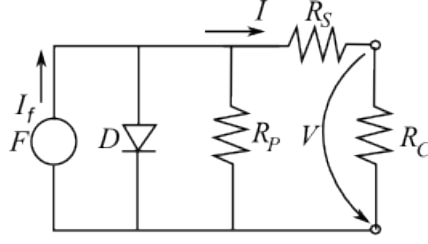


Figura 3.2: Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.

em que I_f é a corrente gerada, I_0 é a corrente de saturação do díodo, m é o fator de idealidade (para um díodo ideal $m = 1$ e para um díodo real $m > 1$) e V_T é a tensão térmica equivalente, dada por:

$$V_T = \frac{k_B T}{q} \quad (3.2)$$

em que k_B é a constante de Boltzmann, T é a temperatura absoluta da célula e q é a magnitude da carga do eletrão. Considerando uma temperatura de 300 K, então $V_T \approx 0.0259$ V. No entanto, para a maior parte das situações R_s pode ser desprezada e R_p pode ser considerada muito grande, simplificando a equação (3.1), resultando em:

$$I = I_f - I_0 \left(e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right) \quad (3.3)$$

Esta expressão é consideravelmente mais simples que a equação (3.1) e como é válida para a maioria das situações, será utilizada no âmbito deste trabalho.

O estudo das células fotovoltaicas comerciais presentes neste trabalho foi feito em duas fases:

- i) utilizando o sistema automático de caracterização de células fotovoltaicas presente no laboratório de ótica orgânica;
- ii) sob a luz solar direta e com a utilização de várias resistências de carga.

O sistema no laboratório de ótica orgânica emitir um sinal ótico com um espectro correspondente ao espectro solar, de forma quase homogênea, numa área suficiente para cobrir integralmente as células fotovoltaicas desenvolvidas pelo grupo de ótica orgânica. Este sistema está projetado de forma a automatizar a obtenção da curva tensão-corrente (IV) de células fotovoltaicas, sendo esquematizado na figura 3.3. Quando a célula se encontra iluminada aplica-se uma diferença de potencial aos terminais da célula e monitoriza-se a corrente elétrica obtida. Ao percorrer diferenças de potencial pré determinado pelo seu utilizador, este sistema, obtém a curva IV da célula. No entanto, as células fotovoltaicas utilizadas neste trabalho são maiores que as células desenvolvidas por esse grupo o que levou à expansão do foco luminoso e a uma perda da intensidade ótica incidente.

Para realizar a caracterização das células sob a luz direta solar foi implementado um sistema com várias resistências de carga, um voltímetro e um amperímetro, como esquematizado

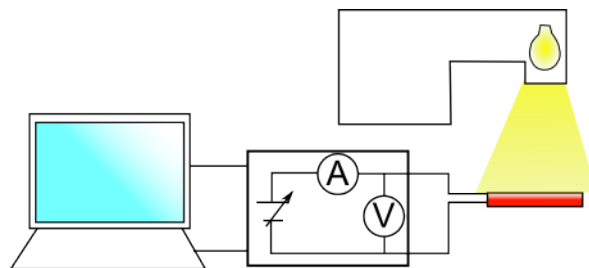


Figura 3.3: Esquema do sistema utilizado no laboratório de ótica orgânica para caracterizações IV de células fotovoltaicas.

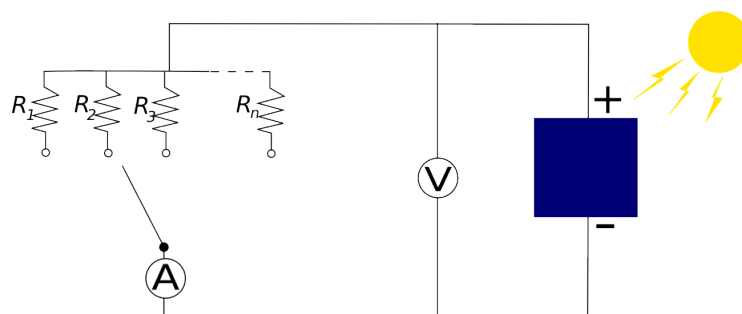


Figura 3.4: Esquema do sistema implementado para estudar as curva IV das células solares comerciais com luz solar direta.

na figura 3.4. Assim, ao alterar a resistência de carga é possível obter os valores para a curva IV.

Este sistema está limitado no número de pontos experimentais obtíveis pelo número de resistência de carga utilizadas.

3.2 Resultados

Com o sistema do laboratório de ótica orgânica foi possível obter um valor de potência máxima de 16.3 mW e 21.7 mW, respetivamente, para a célula 1 e para a célula 2. No entanto, os valores de potência máxima efetiva foram de 9.0 mW e 9.5 mW o que permite estimar o valor para o fator de preenchimento de respetivamente 55,5% e 43,6%. As curvas IV obtidas podem ser vistas na figura 3.5. No entanto, este sistema tinha limitações em relação ao tamanho máximo das células caraterizadas, logo, não foi utilizado na continuação deste trabalho.

Na segunda parte dos testes as curvas IV das células foram medidas individualmente e posteriormente foi realizada a caracterização com as duas células em série e em paralelo. Sendo possível verificar que quando duas células solares são colocadas em série a sua tensão em circuito aberto é dada aproximadamente pela soma das tensões das células individuais e a corrente em curto circuito extraída é dominada pela menor corrente gerada por cada célula. Além disso, é possível verificar que quando duas células estão colocadas em paralelo a tensão em circuito aberto obtida é dominada pela menor das tensões individuais, e a corrente em curto circuito gerada é dada aproximadamente pela soma das correntes geradas por cada célula.

Os dados da caracterização experimental foram ajustados à expressão (3.3), desta forma

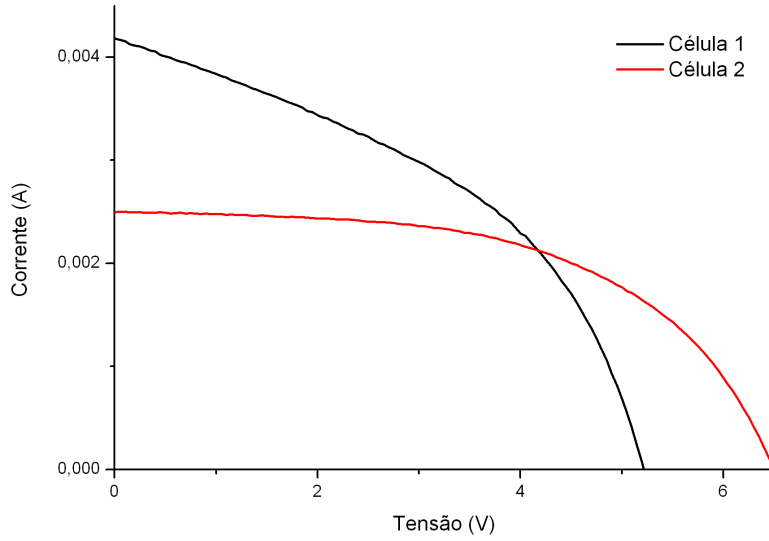


Figura 3.5: Curva IV para as células fotovoltaicas consideradas obtida no laboratório de ótica orgânica.

é possível caracterizar devidamente as células. Para fazer este ajuste foi criado um *script* em *matlab*[®] onde é invocada a função *nlinfit* que utiliza o algoritmo de mínimo quadrado não linear de Levenberg-Marquardt. Os pontos experimentais e as respectivas linhas de ajuste podem ser observados na figura 3.6.

Para o ajuste foi considerada uma temperatura ambiente de 300 K. Os valores obtidos para os parâmetros podem ser visualizados na tabela 3.2. Nessa tabela podemos ver que os valores do coeficiente de correlação (r^2) são muito próximos de 1 o que indica que os ajustes têm boa qualidade.

Tabela 3.2: Parâmetros de ajuste das células solares.

	I_0	mV_T	I_f	m	r^2
célula 1	1.72×10^{-5}	0.74	3.57×10^{-2}	28.72	0.999
célula 2	4.28×10^{-4}	1.74	2.23×10^{-2}	67.13	0.999
série	6.66×10^{-5}	2.15	2.32×10^{-2}	83.05	0.999
paralelo	9.01×10^{-5}	0.91	5.83×10^{-2}	35.17	0.999

Para obter a caracterização das células foram utilizados os parâmetros obtidos nos ajustes anteriores para estimar P_{mt} e P_{me} . Com os valores de P_{mt} e P_{me} foi obtido o valor de FF . Por fim, considerando a intensidade solar incidente como sendo 1000 W/m^2 , foi possível obter a eficiência máxima de conversão, η_m . Os resultados obtidos na caracterização das células fotovoltaicas podem ser consultados na tabela 3.3.

3.3 Simulação do meio de transmissão

Com o objetivo de estudar a eficiência de células fotovoltaicas, para uso na implementação da tecnologia de transmissão de energia por sinal ótico em espaço livre, procedeu-se à simulação da propagação de um sinal ótico num meio turbulento.

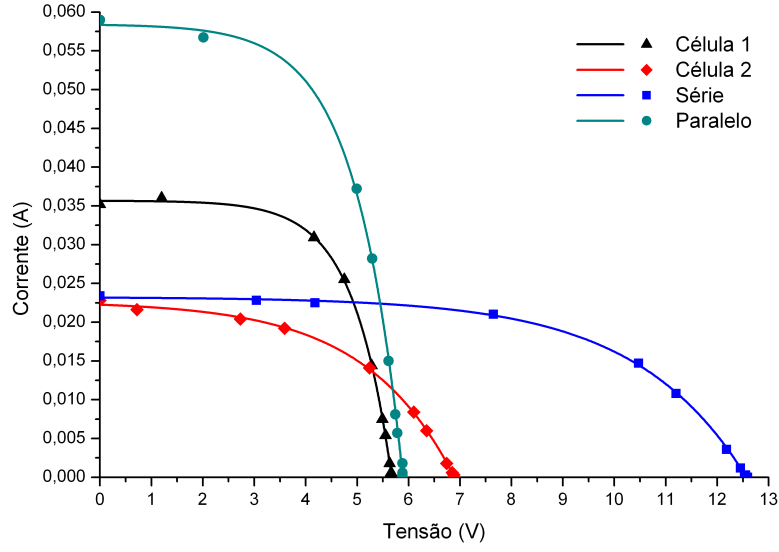


Figura 3.6: Curvas IV para as células fotovoltaicas estudadas expostas à luz solar direta. Para além dos valores para as células isoladas estão representados também os valores para as células equivalentes quando as células se encontram ligadas eletricamente em série e em paralelo.

Tabela 3.3: Características das células fotovoltaicas.

	$P_{me}(W)$	$P_{mt}(W)$	$FF(\%)$	$\eta_m(\%)$	$P_{incidente}(W)$
célula 1	0.13	0.20	63.22	6.93	2.9
célula 2	0.08	0.16	48.73	6.54	2.4
série	0.17	0.29	57.51	5.58	5.3
paralelo	0.21	0.35	59.77	6.57	5.3

Para conhecer a eficiência da geometria das células fotovoltaicas consideraram-se dois cenários:

- i) para sub-células fotovoltaicas em série;
- ii) para sub-células fotovoltaicas em paralelo.

A maioria dos sinais óticos gerados por lasers possuem um perfil de intensidade com distribuição gaussiana, dada por:

$$f(x, y) = Ae^{-\left(\frac{(x - x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y - y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right)} \quad (3.4)$$

onde A é a máxima amplitude, x_0 e y_0 são as coordenadas do centro da distribuição e σ_x e σ_y são respetivamente a largura para uma intensidade $e^{-0.5}$ para cada um dos eixos x e y . Para obter um feixe circular é necessário fazer $\sigma_x = \sigma_y$

No entanto, a utilização de um conjunto específico de lentes pode transformar um feixe com perfil gaussiano num feixe com um perfil homogéneo e circular, dado por:

$$f(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{se } \sqrt{x^2 + y^2} > r \\ Cte & \text{se } \sqrt{x^2 + y^2} \leq r \end{cases} \quad (3.5)$$

O objetivo de procurar a melhor geometria para a célula fotovoltaica passa pela simulação da propagação do sinal ótico por um meio turbulento de forma a ser deformado realisticamente. Para tal implementou-se uma rotina em C que considera um feixe ótico, com um perfil gaussiano, a propagar-se por um percurso atmosférico turbulento, cujas características respeitam o modelo descrito no capítulo 2 para a turbulência. A escolha da linguagem de programação C deve-se à sua rapidez e aos poucos recursos computacionais que utiliza. O algoritmo implementado foi o seguinte:

- i* Geração de uma matriz de intensidade centrada no ponto central da matriz;
- ii* Conversão da matriz em número de fótons individuais;
- iii* Geração de um domínio de turbulência esférica cujo diâmetro se encontra entre l_0 (1 mm) e L_0 (100 m) [26], e calculados numa posição aleatória dentro do percurso;
- iv* Cálculo da temperatura nesse domínio de turbulência através das expressões (2.19) e (2.20) e considerando o valor de C_n pretendido;
- v* Calcula-se C_n médio de todo o espaço propagado, se for menor de C_n pretendido volta-se ao passo *iii*;
- vi* A partir da expressão (2.18) calcula-se o índice de refração local;
- vii* Calcula-se o percurso de cada fóton tendo em consideração a lei de Snell;
- viii* Verifica-se a posição dos fótons e é feita a sua adição a uma matriz final de saída.

O código em C foi compilado num executável através do programa *Dev - C++*. Posteriormente, foi utilizado o *matlab*® para correr o executável inicial e apresentar os dados obtidos. Seguidamente, foi efetuado um novo *script* em *matlab*® para correr o executável sucessivas vezes, de forma a obter várias matrizes de intensidade e posteriormente analisar a eficiência de células solares a estas variações de intensidade.

Embora o algoritmo descrito anteriormente funcione e dê valores que se encontram dentro do esperado, é também um algoritmo muito lento visto ter de ser processado todo o percurso do sinal ótico, tendo um tempo de simulação de vários dias. Assim, foi implementado um outro algoritmo mais simples e com base na equação 2.23 para calcular a alteração da intensidade provocada pela cintilação e a equação 2.21 para calcular o deslocamento do raio provocado pela turbulência. Desta forma, o novo algoritmo é o seguinte:

- Geração de uma matriz de perfil do feixe ótico a duas dimensões centrado no ponto central da matriz;
- Cálculo da variância do logaritmo da intensidade instantânea, $\sigma_{i(t)}^2$, através da equação 2.23;
- Cálculo da intensidade instantânea, no recetor, utilizando a matriz inicial com o perfil do feixe ótico;

- Cálculo de σ_r^2 através da equação 2.21;
- Cálculo da absorção no percurso, através da equação 2.1;
- Cálculo da eficiência de cada célula.

Como $\sigma_{i(t)}$ e σ_r são os valores do desvio padrão de uma distribuição normal, para converter $\sigma_{i(t)}$ em intensidade instantânea, $i(t)$, e σ_r em deslocamento do feixe, r , utilizou-se a função de *matlab*[®] *randn*. Esta função gera números pseudo-aleatórios com uma distribuição normal que são posteriormente multiplicados pelo desvio padrão.

Este algoritmo assemelha-se a um algoritmo de *Ramdon Walk*, no sentido em que são necessárias várias iterações com a geração de diferentes números aleatórios para se obter resultados com validade estatística.

Considerando as células caracterizadas no capítulo anterior, foi efetuada a simulação para estas duas células com os valores obtidos na sua caracterização. O esquema considerado das células solares pode ser visto na figura 3.7.

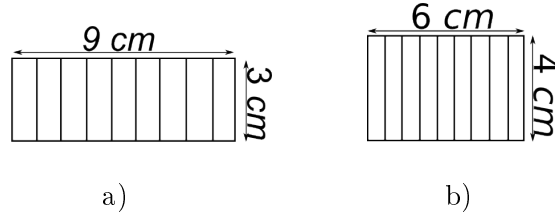


Figura 3.7: Esquema das células fotovoltaicas utilizadas. a) célula 1 e b) célula 2.

Além destas duas células, foram também testadas outras geometrias para encontrar as células mais eficientes. Assim, tendo em conta o perfil circular esperado do sinal foi gerada uma célula com a geometria presente no esquema da figura 3.8.

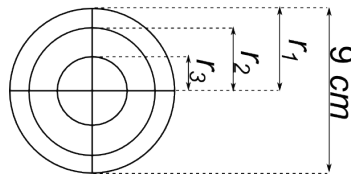


Figura 3.8: Esquema da célula fotovoltaica simulada. Neste esquema o raio externo é representado por r_1 , o raio intermédio por r_2 e raio interno por r_3 .

Esta célula foi considerada como estando dividida entre os dois lados de forma simétrica. As sub-células de cada lado estão ligadas entre si em série e os dois lados estão ligados entre si em paralelo. Admitindo que cada célula individual produz aproximadamente 1 V, para o caso de GaAs [9], irá ser gerada uma tensão em circuito aberto de aproximadamente 6 V. Para esta célula considerou-se que as áreas de cada sub-célula são iguais, isto é:

$$\frac{1}{2}\pi r_3^2 = \frac{1}{2}\pi(r_3^2 - r_2^2) = \frac{1}{2}\pi(r_2^2 - r_1^2) \Leftrightarrow \begin{cases} r_3 = 45 \times \sqrt{2/3} \text{ mm} \\ r_2 = 45 \times \sqrt{1/3} \text{ mm} \\ r_1 = 45 \text{ mm} \end{cases} \quad (3.6)$$

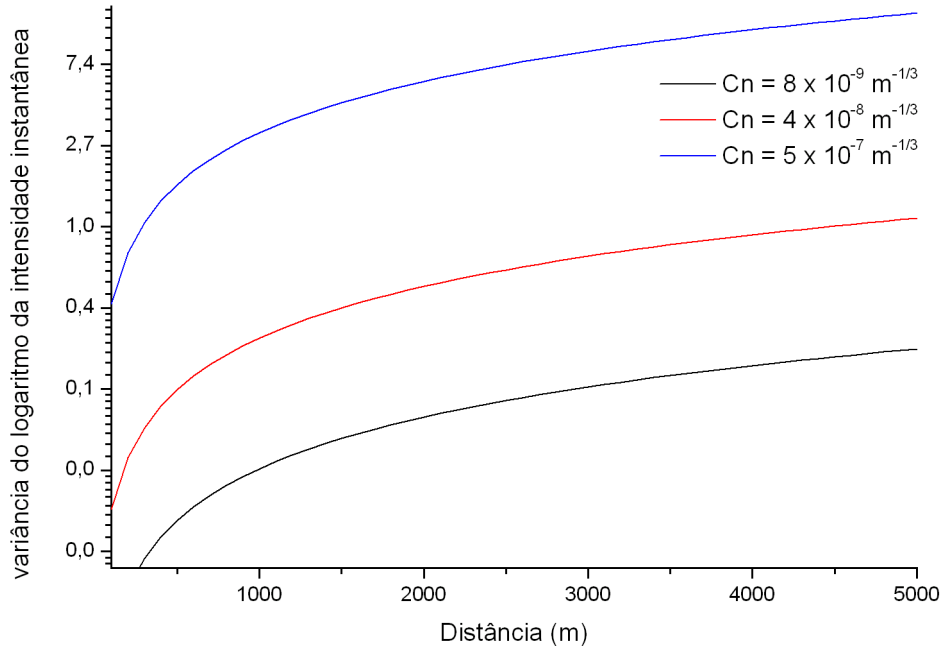


Figura 3.9: Variância da intensidade do sinal óptico para valores típicos da constante de estrutura do índice de refração em função da distância de propagação.

em que o raio externo, r_1 , é 45 mm como está representado na figura 3.8.

Inicialmente calculou-se a variância da intensidade do feixe, provocada pela cintilação, e a variância da posição do feixe, provocada pelo deslocamento, do feixe como resultado da turbulência através de respectivamente a equação 2.23 e a equação 2.21. Assim, considerando um comprimento de onda de 850 nm, foram obtidos valores em função da distância de propagação cujos resultados encontram-se nas figuras 3.9 e 3.10.

O passo que se efetuou de seguida consistiu na simulação da eficiência das células 1, 2 e 3 para diferentes diâmetros do feixe óptico. A primeira situação considerou a utilização de um feixe óptico circular, homogêneo, em função do raio e na segunda situação considerou-se a utilização de um feixe óptico com perfil gaussiano em função do desvio padrão, σ . Os resultados das eficiências máximas obtidos através das simulações encontram-se nas figuras 3.11 e 3.12, respectivamente para o feixe homogêneo e para o feixe de perfil gaussiano. Nesta simulação não é considerada qualquer turbulência nem atenuação de sinal.

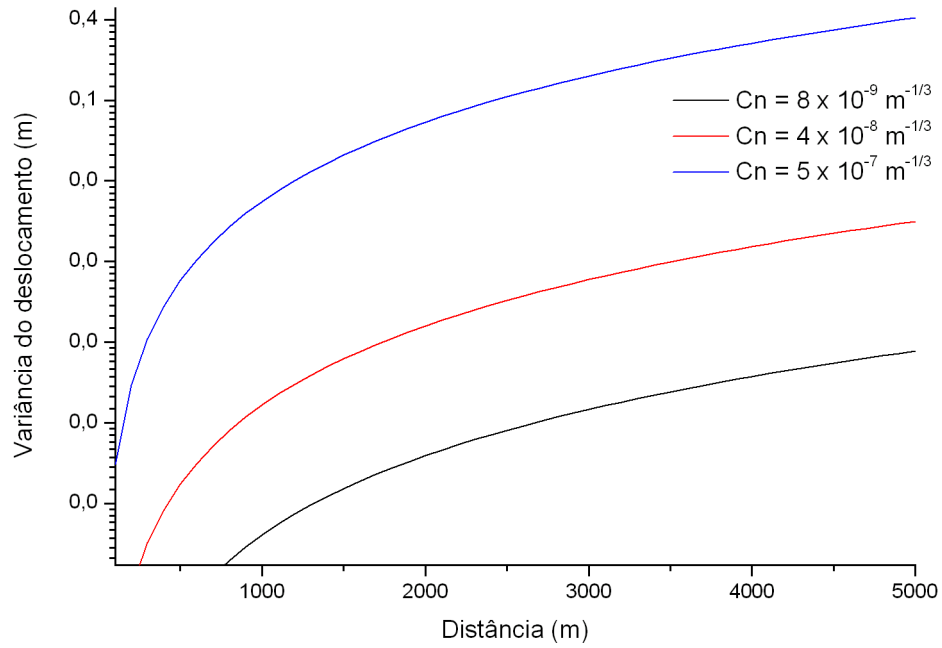


Figura 3.10: Variância do deslocamento do sinal óptico para valores típicos da constante de estrutura do índice de refração função da distância de propagação.

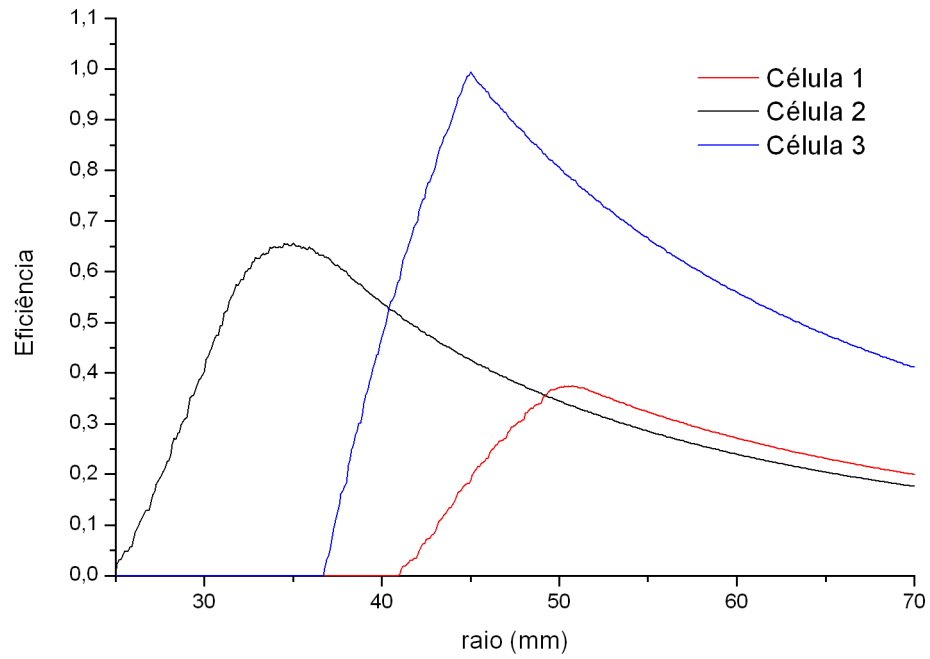


Figura 3.11: Eficiência das células em função do raio do feixe óptico circular homogêneo.

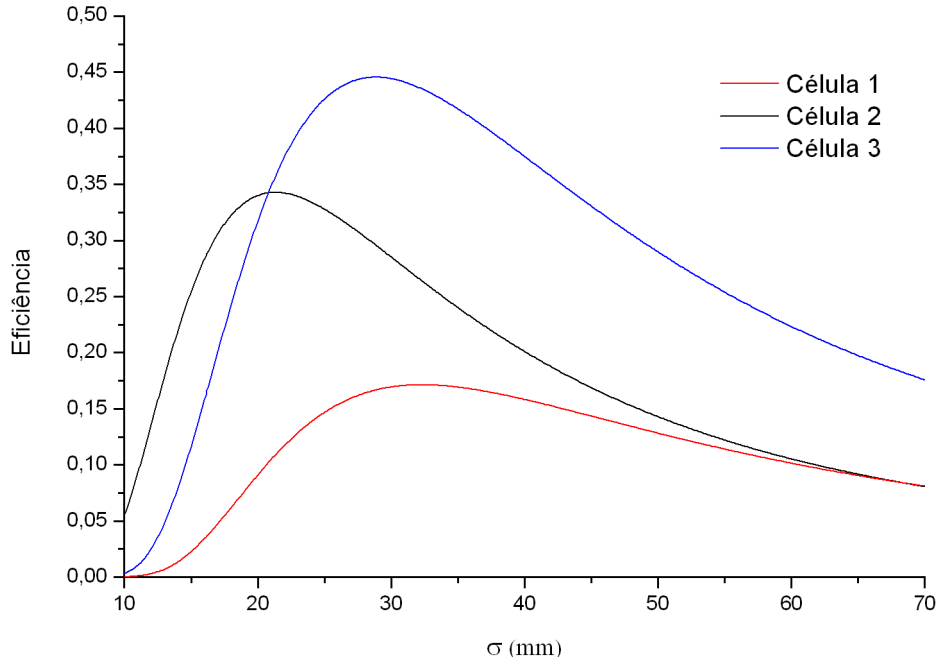


Figura 3.12: Eficiência das células em função da largura do feixe ótico circular gaussiano.

Nestes gráficos é observado que todas as células possuem uma maior eficiência para um feixe homogêneo que para um feixe gaussiano. Isto deve-se ao facto do feixe homogêneo incidir de forma mais homogênea em toda a célula. Além disso, quando o raio do feixe homogêneo é demasiado pequeno para iluminar todas as sub-células, as sub-células não iluminadas vão dominar o comportamento da célula e não haverá conversão eficiente de energia. Já o feixe gaussiano, ao não incidir de forma homogênea, vai fazer com que as sub-células com menos intensidade incidente dominem o comportamento da célula. Podemos ainda ver que a transmissão de energia vai ser mais eficiente para a célula 2 que para a célula 1. Isto deve-se ao facto de ter uma área maior do feixe incidente que passa ao lado da superfície da célula 1 por esta ter um maior rácio entre comprimento e largura que a célula 2 e o feixe ser circular. Com estas simulações chegou-se a valores para a eficiência máxima, η_m , para as 3 células como pode ser observado na tabela 3.4.

Tabela 3.4: Parâmetros obtidos por simulação para obter a eficiência máxima das células 1, 2 e 3.

	perfil gaussiano		perfil homogêneo	
	η_m	σ (mm)	η_m	r (mm)
célula 1	0.17	32.3	0.37	50.5
célula 2	0.34	21.3	0.66	35.0
célula 3	0.45	28.8	0.99	45

A não obtenção de uma eficiência de conversão total nestes casos deve-se à intensidade do sinal ótico não incidir na sua totalidade na célula e/ou às sub-células não chegar uma intensidade igual entre elas.

O passo seguinte considera a propagação num espaço sujeito à turbulência atmosférica. Assim, foi simulada a propagação do feixe ótico num espaço sujeito a uma atenuação de

$0.126 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ e turbulência com os diferentes valores típicos da constante estrutural do índice de refração. Nesta simulação foram utilizados os parâmetros para os feixes calculados anteriormente e presentes na tabela 3.4. Os valores obtidos nesta simulação podem ser observados nos gráficos presentes nas imagens 3.13, 3.14 e 3.15 respectivamente para a célula 1, para a célula 2 e para a célula 3.

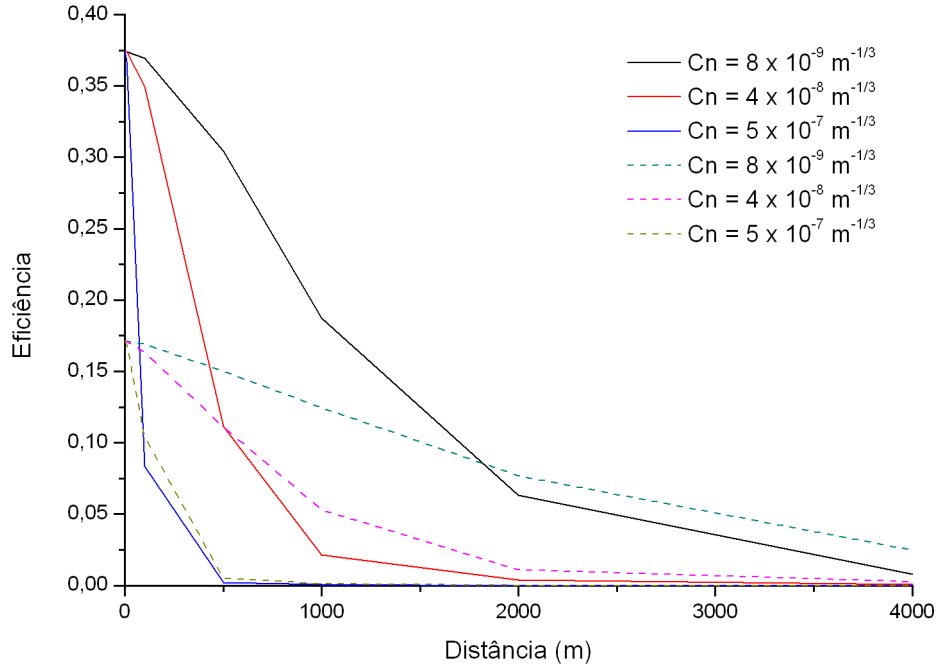


Figura 3.13: Eficiência da célula 1 para diferentes valores de C_n . Os valores para o feixe homogêneo encontram-se com linha contínua. Os valores para o feixe gaussiano encontram-se com linha tracejada.

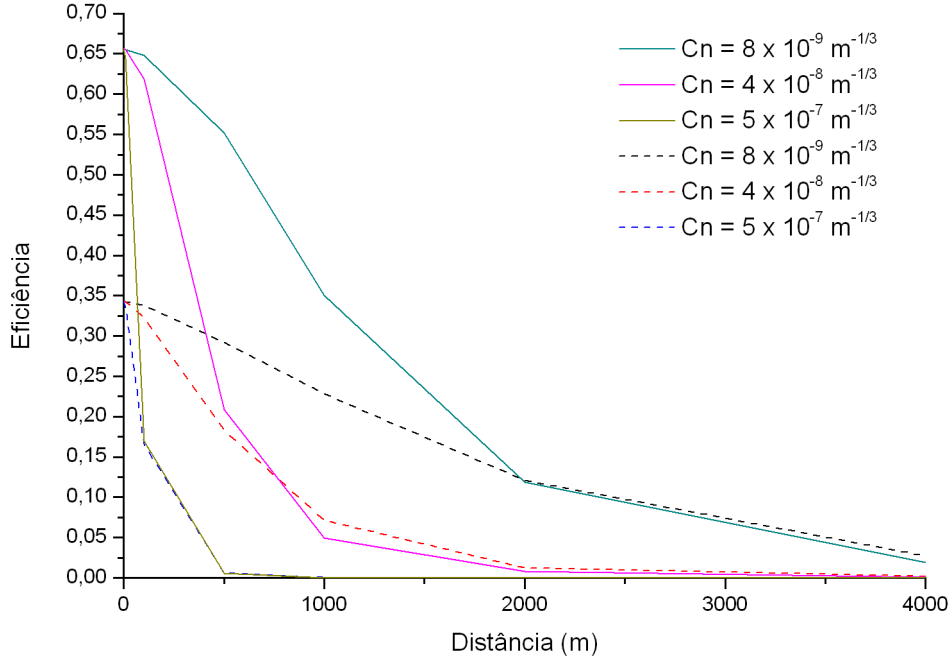


Figura 3.14: Eficiência da célula 2 para diferentes valores de C_n . Os valores para o feixe homogêneo encontram-se com linha contínua. Os valores para o feixe gaussiano encontram-se com linha tracejada.

O aumento da turbulência provoca a diminuição da eficiência. Esta diminuição é verificável tanto para o feixe com perfil homogêneo como com perfil gaussiano. Pode ainda ser verificado que para as distâncias iniciais o feixe homogêneo é mais eficiente que o correspondente feixe gaussiano, no entanto, após uma certa distância deixa de ser o caso. Isto deve-se ao facto do feixe homogêneo estar mais concentrado espacialmente que o feixe gaussiano e o seu deslocamento poder provocar a completa, ou quase completa, ausência de intensidade incidente em algumas sub-células. Por outro lado, por estar mais espalhado espacialmente, o deslocamento do feixe gaussiano vai provocar uma redução da intensidade incidente menos drástica. Esta conclusão verifica-se para todas as células e para todos os tipos de turbulência considerados.

Para analisar qual é o condicionamento que as condições meteorológicas provocam na eficiência da transmissão de energia por sinal ótico foram corridas várias simulações tanto para a presença de nevoeiro como para a presença de chuva. As condições utilizadas envolveram a utilização de uma constante estrutural de refração, C_n , com valor de $4 \times 10^{-8} \text{ m}^{-1/3}$. Para o nevoeiro e a chuva em função, respetivamente, de valores de visibilidades, V , e precipitação, R , diferentes. Além disto foram utilizados os parâmetros presentes na tabela 3.4 para gerar os feixes óticos utilizados. Desta forma foi possível obter os resultados presentes nas figuras 3.16, 3.17 e 3.18 para a presença de nevoeiro e nas figuras 3.19, 3.20 e 3.21 para a presença de chuva.

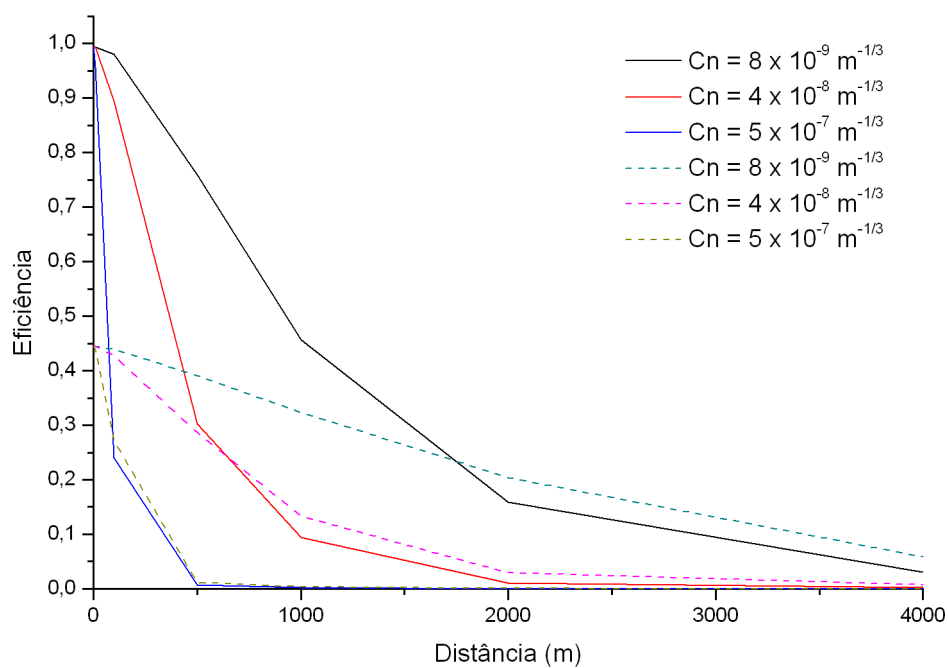


Figura 3.15: Eficiência da célula 3 para diferentes valores de C_n . Os valores para o feixe homogêneo encontram-se com linha contínua. Os valores para o feixe gaussiano encontram-se com linha tracejada.

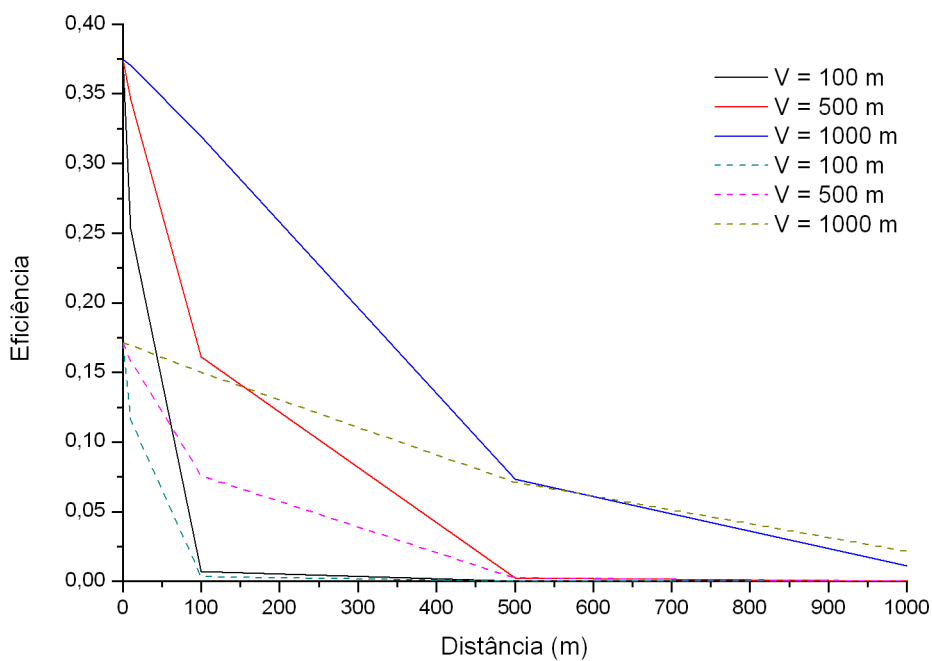


Figura 3.16: Eficiência da célula 1 na presença de nevoeiro. Os valores para o feixe homogêneo encontram-se com linha contínua. Os valores para o feixe gaussiano encontram-se com linha tracejada.

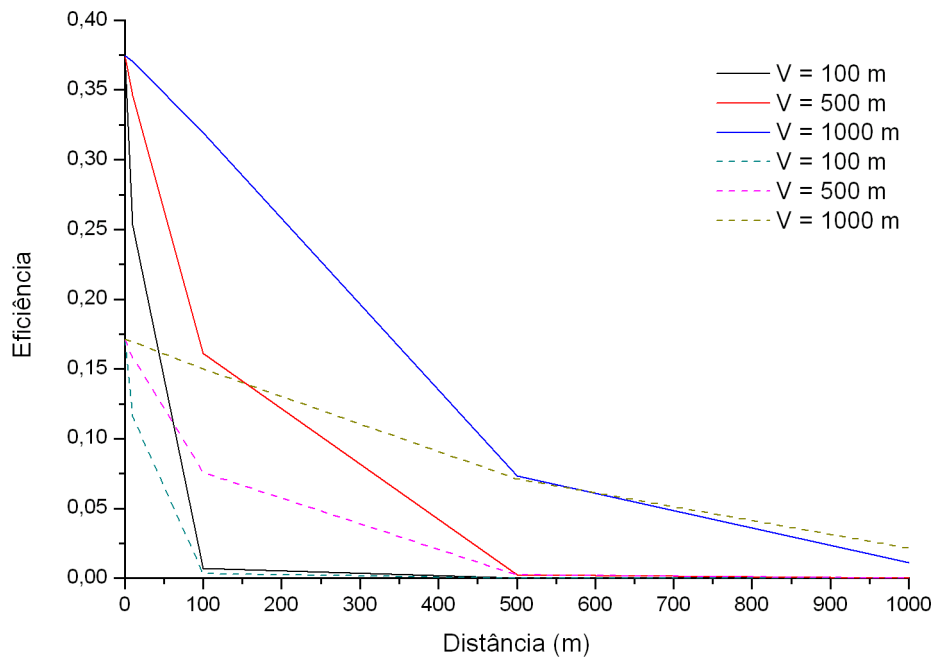


Figura 3.17: Eficiência da célula 2 na presença de nevoeiro. Os valores para o feixe homogêneo encontram-se com linha contínua. Os valores para o feixe gaussiano encontram-se com linha tracejada.

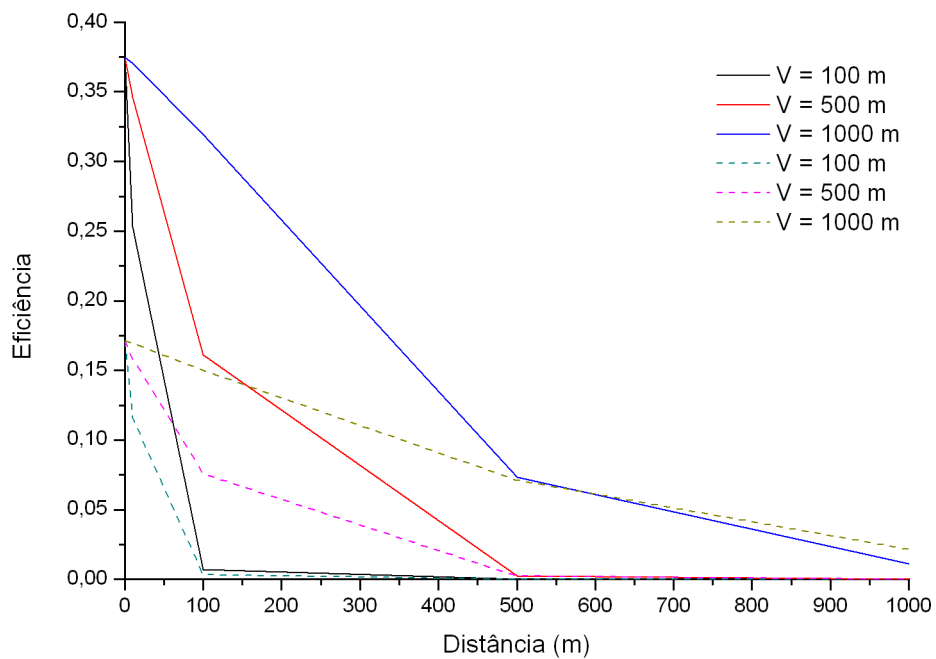


Figura 3.18: Eficiência da célula 3 na presença de nevoeiro. Os valores para o feixe homogêneo encontram-se com linha contínua. Os valores para o feixe gaussiano encontram-se com linha tracejada.

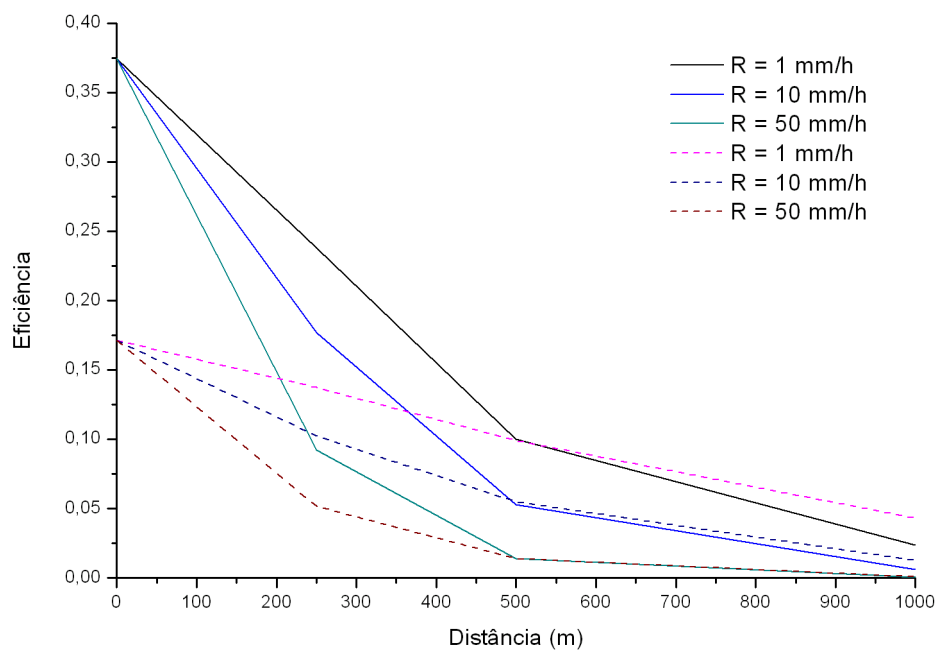


Figura 3.19: Eficiência da célula 1 na presença de chuva. Os valores para o feixe homogêneo encontram-se com linha contínua. Os valores para o feixe gaussiano encontram-se com linha tracejada.

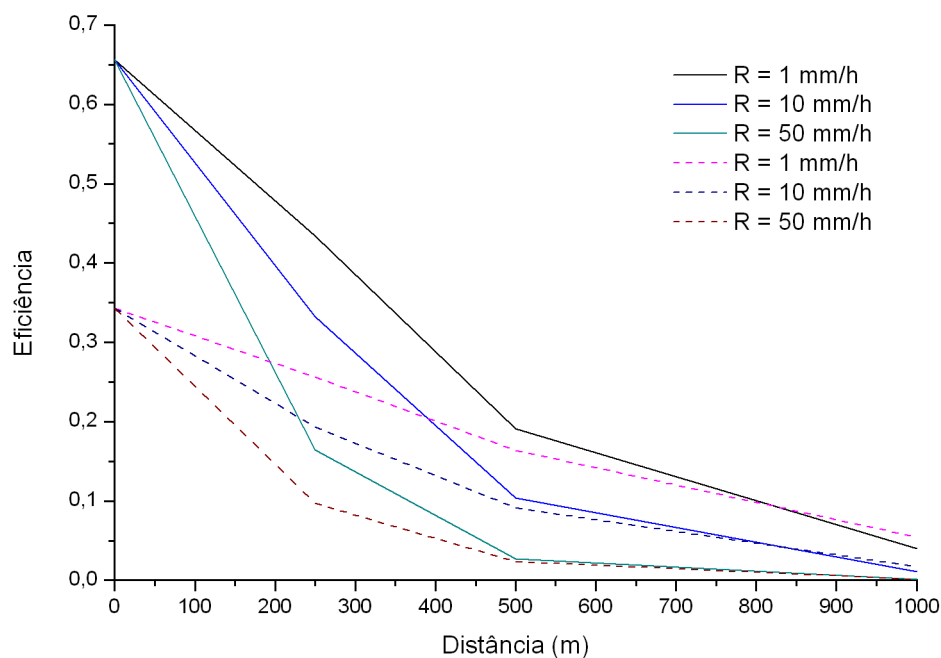


Figura 3.20: Eficiência da célula 2 na presença de chuva. Os valores para o feixe homogêneo encontram-se com linha contínua. Os valores para o feixe gaussiano encontram-se com linha tracejada.

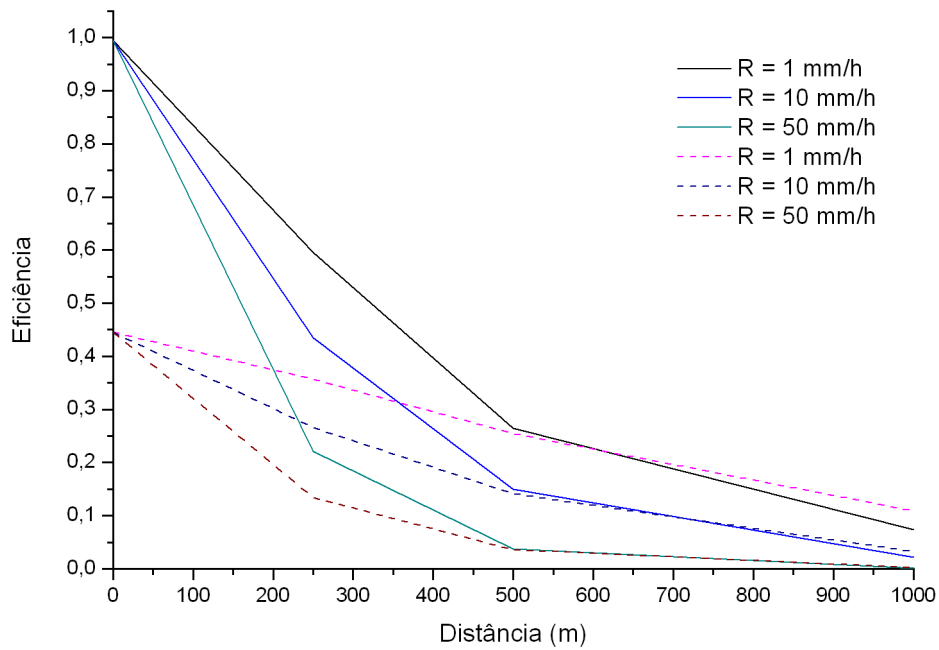


Figura 3.21: Eficiência da célula 3 na presença de chuva. Os valores para o feixe homogêneo encontram-se com linha contínua. Os valores para o feixe gaussiano encontram-se com linha tracejada.

Nestes gráficos nota-se a deterioração da eficiência com o piorar das condições atmosféricas, tanto para o nevoeiro como para a chuva. Esta deterioração deve-se ao aumento da atenuação do sinal ótico. Esta deterioração verifica-se para todas as células e para todos os feixes óticos. Além disto, nota-se que quando se ultrapassa uma certa distância de propagação, a eficiência do feixe gaussiano é superior à do feixe homogêneo. Esta alteração do tipo de feixe mais eficiente aparece para uma distância aproximada à obtida para o caso em que não há condicionantes meteorológicos, o que indica que a atenuação do sinal não contribui para esta alteração. Desta forma é apenas dependente da turbulência atmosférica.

Uma outra análise possível, consiste na utilização do simulador para testar o comportamento destes sistemas quando o feixe ótico se propaga por um meio turbulento para diferentes valores de alargamento do feixe. Assim, usando um coeficiente estrutural do índice de refração de $4 \times 10^{-8} \text{ m}^{-1/3}$ foram obtidos os resultados, em função da distância propagada, das figuras 3.22, 3.23 e 3.24 respetivamente para a célula 1, 2 e 3. Utilizando tanto feixes homogêneos como gaussianos, sendo respetivamente os valores presentes nos gráficos os raios e os desvios padrão em mm. Posteriormente, para o mesmo alargamento do feixe fixou-se a distância propagada em 200 m e foram obtidos os resultados, em função do coeficiente estrutural do índice de refração, das figuras 3.25, 3.26 e 3.27 respetivamente para a célula 1, 2 e 3.

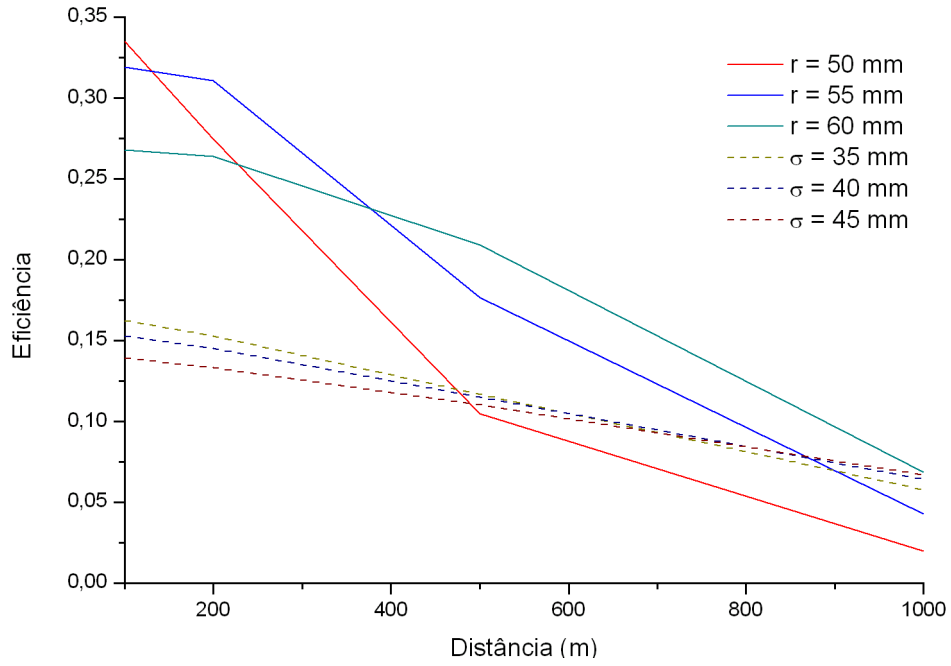


Figura 3.22: Eficiência da célula 1 para diferentes alargamentos dos feixes com $C_n = 4 \times 10^{-8}$. Os valores para o feixe homogêneo encontram-se com linha contínua. Os valores para o feixe gaussiano encontram-se com linha tracejada.

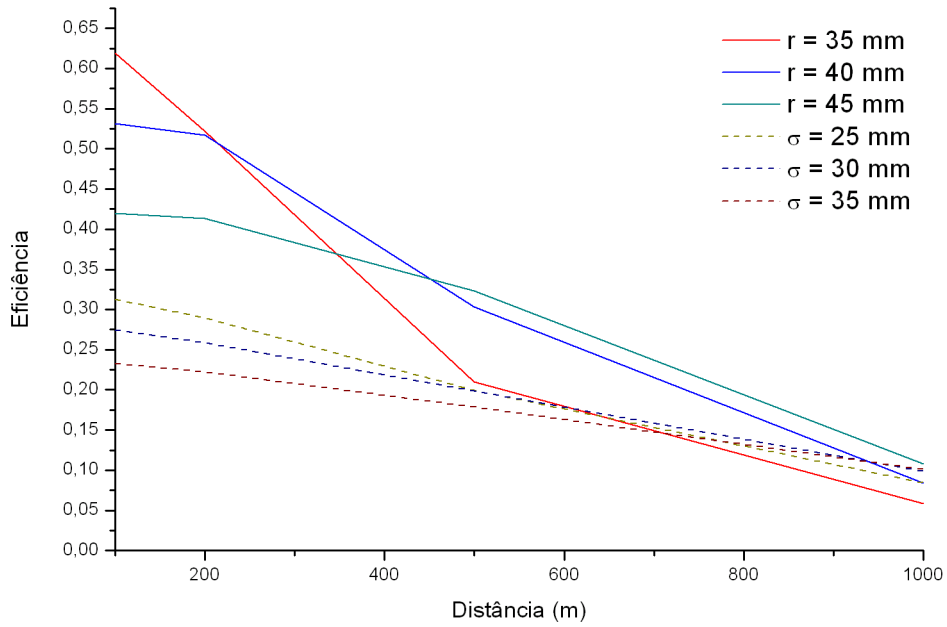


Figura 3.23: Eficiência da célula 2 para diferentes alargamentos dos feixes com $C_n = 4 \times 10^{-8}$. Os valores para o feixe homogêneo encontram-se com linha contínua. Os valores para o feixe gaussiano encontram-se com linha tracejada.

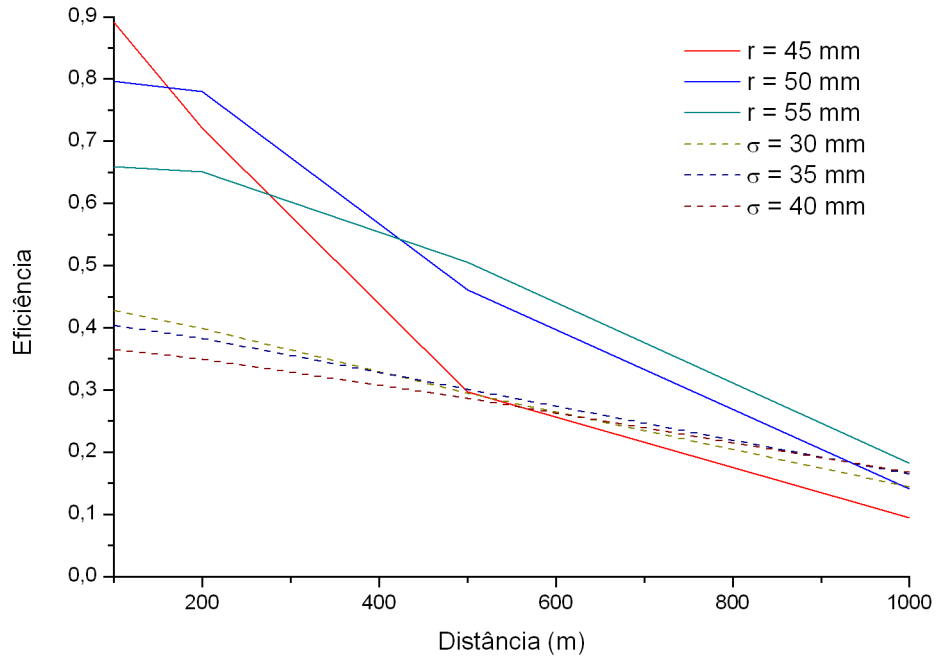


Figura 3.24: Eficiência da célula 3 para diferentes alargamentos dos feixes com $C_n = 4 \times 10^{-8}$. Os valores para o feixe homogêneo encontram-se com linha contínua. Os valores para o feixe gaussiano encontram-se com linha tracejada.

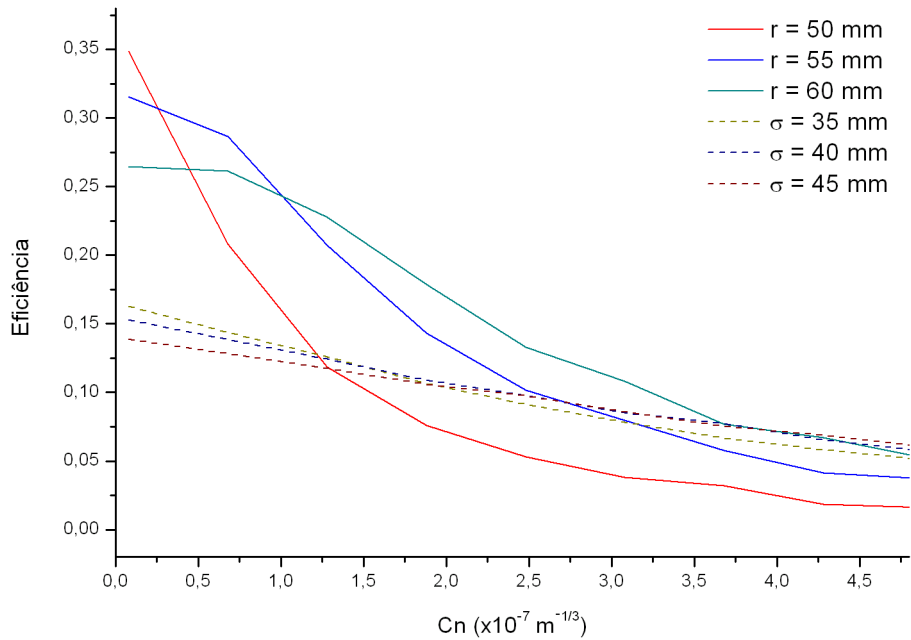


Figura 3.25: Eficiência da célula 1 para diferentes alargamentos dos feixes para uma distância de 200 m. Os valores para o feixe homogêneo encontram-se com linha contínua. Os valores para o feixe gaussiano encontram-se com linha tracejada.

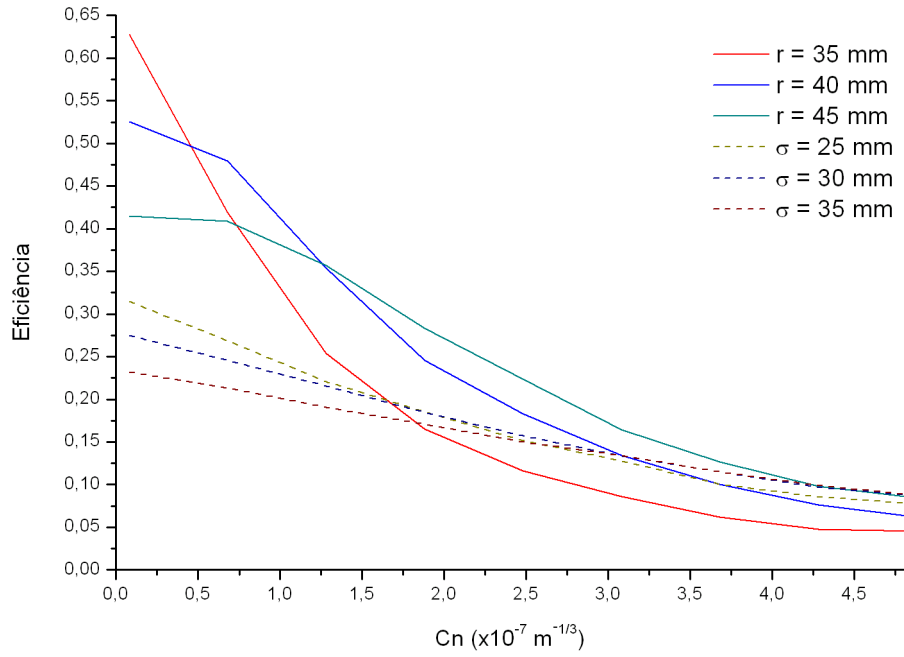


Figura 3.26: Eficiência da célula 2 para diferentes alargamentos dos feixes para uma distância de 200 m. Os valores para o feixe homogêneo encontram-se com linha contínua. Os valores para o feixe gaussiano encontram-se com linha tracejada.

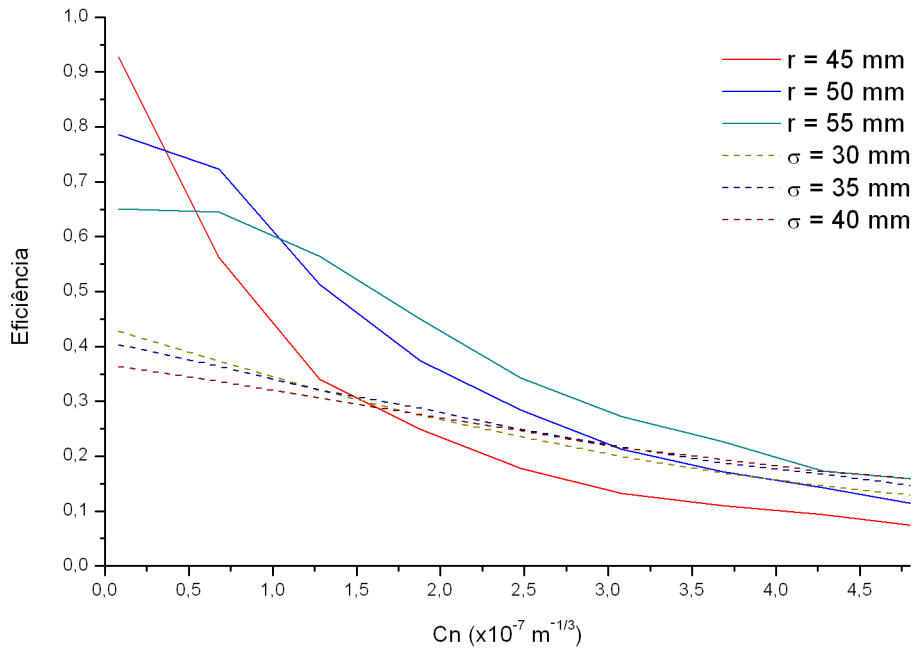


Figura 3.27: Eficiência da célula 3 para diferentes alargamentos dos feixes para uma distância de 200 m. Os valores para o feixe homogêneo encontram-se com linha contínua. Os valores para o feixe gaussiano encontram-se com linha tracejada.

Com estas simulações podemos observar, como também já tinha sido observado nas simulações anteriores, que após uma certa distância propagada ou a partir de um valor do coeficiente estrutural do índice de refração é mais eficiente utilizar um feixe de perfil gaussiano que um de perfil homogêneo. Além disso, é interessante observar nestes gráficos que quando um feixe ótico se propaga por um ambiente turbulento torna-se mais eficiente aumentar o seu alargamento. Esse aumento vai depender de coeficiente estrutural do índice de refração e da distância de propagação. Quando se aumenta qualquer um destes parâmetros vai aumentar σ_r , o que aumenta a probabilidade do feixe se desviar por completo da superfície de algumas sub-células, assim, o alargamento do feixe diminui esta probabilidade. A eficiência máxima possível é obtida quando se equilibra a probabilidade do feixe incidir de forma homogênea em todas as sub-células com a área do feixe ótico que se desperdiça por passar ao lado da superfície da célula. Estas conclusões deverão ser tidas em conta quando se projetar um sistema para transmissão de energia em espaço livre.

3.4 Conclusões

Na caracterização das células foram obtidos valores diferentes para cada realização experimental. Uma justificação possível deve-se à impossibilidade do sistema presente no laboratório de ótica orgânica conseguir incidir de forma homogênea na totalidade da área das células fotovoltaicas usadas. Assim, os resultados obtidos com esse sistema serão descartados, e apenas utilizados os obtidos na segunda fase da caracterização. Desta forma obtemos os valores para eficiência máxima de 6.9 % e um fator de preenchimento de 63.2 % para a célula 1 e uma eficiência de 6.5 % e um fator de preenchimento de 48.7 % para a célula 2. Embora a célula 2 seja mais eficiente que a célula 1 é necessário ter também em conta que o fator de preenchimento da célula 1 também é melhor que o da célula 2. Além disso, nesta caracterização foi utilizada uma intensidade luminosa homogênea em toda a célula o que difere da fonte luminosa a utilizar numa futura aplicação que terá um perfil gaussiano.

Neste capítulo foi desenvolvido e implementado um simulador que permite obter valores de eficiência na transmissão em espaço livre turbulento para células solares específicas.

Através da simulação do meio de propagação turbulento foi possível concluir que a eficiência da transmissão vai depender de vários fatores. Os valores de eficiência máxima possíveis com um feixe de perfil gaussiano para a célula 1, 2 e 3 são respetivamente 34.3 %, 17.1 % e 44.6 %. Estes valores reduzidos para a célula 1 e 2 ocorrem porque essas células são retangulares e o feixe é circular, assim, vai haver uma parte do feixe que não é recolhido pela célula ou uma parte da célula que não vai ser devidamente iluminada. No entanto, utilizando um feixe homogêneo essas eficiências aumentam para 65.6 %, 37.4 % e 99.4 % respetivamente para a célula 1, 2 e 3. Estes valores de eficiência máxima são obtidos quando não são consideradas as perdas de transmissão devidas à atenuação do sinal ou à turbulência atmosférica.

Quando são consideradas as perdas devido à atenuação do meio e devido à turbulência a eficiência obtida é reduzida. Esta redução vai depender dos constituintes do meio, como o nevoeiro e a chuva, da distância propagada, da turbulência atmosférica e do diâmetro do feixe ótico. Em relação aos constituintes da atmosfera não é possível tomar nenhuma medida para melhorar a eficiência. No entanto, com estas simulações é visível que com o aumento da distância propagada e/ou da turbulência atmosférica há um aumento do diâmetro do feixe ótico para o qual existe uma eficiência máxima. Essa melhoria foi mostrada para todas as

células simuladas com todo o tipo de feixe simulados.

Por fim, considerando que as células 1 e 2 têm respetivamente uma eficiência de conversão de 6.9 % e de 6.5 %, que a eficiência de máxima de transmissão para estas células é respetivamente 37.4 % e 65.6% e que a fonte do sinal ótico tem uma eficiência de 57 % [19], então um sistema que utilize estas células teria uma eficiência máxima de 1.5 % e 2.5 % respetivamente. Assim, a célula 2, embora tenha uma eficiência de conversão inferior à célula 1 torna-se a célula mais eficiente neste sistema. No entanto, considerando que há perdas de atenuação e turbulência no meio propagado, essas eficiências, só por si já são consideradas reduzidas, serão ainda mais reduzidas.

Já se o sistema usar a célula 3, com uma eficiência de conversão teórica máxima medida de 50 % [32] e uma eficiência máxima de transmissão de 99.4 %, e mantendo a mesma fonte do sinal ótico, terá uma eficiência máxima de 28.2 %. Assim, um sistema que utilizasse esta célula simulada já seria praticável, no entanto, ao considerar a sua eficiência com um coeficiente estrutural do índice de refração de 4×10^{-8} , atenuação do sinal de $0.126 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ e um percurso de 500 m e 1000 m, a eficiência é reduzida respetivamente para 14.6 % e 6.5 %.

4 Propagação em Fibra

4.1 Funcionamento de amplificação Raman

Nos sistemas de comunicações óticas regista-se uma atenuação da intensidade do sinal ótico propagado ao longo da fibra, assim, nos troços de fibra mais extensos é necessário realizar amplificação ótica dos sinais. Existem várias técnicas para a realização de amplificação ótica, entre elas encontra-se o EDFA (amplificador de fibra dopada com Érbio), do SOA (amplificador ótico de semiconductor), e o efeito de Raman. A amplificação Raman ocorre devido à interação entre a radiação eletromagnética dos sinais e as moléculas de sílica da fibra ótica. Deste processo decorre a alteração da frequência dos fótons de bombeamento para a frequência do sinal, o que gera a amplificação deste. Parte dos fótons de bombeamento não participam no processo o que significa um desperdício de parte da potência produzida pelo laser de bombeamento.

As redes PON são completamente passivas podendo, no entanto, ser desejável a utilização de componentes que requerem alimentação elétrica para monitorização, proteção e restauração da rede em caso de falha. Assim, a utilização de amplificadores Raman espalhados já permitiu a utilização de troços de 60 km de fibra ótica em redes GPON (Gigabit PON), mantendo-se como uma tecnologia a utilizar no futuro [33]. Logo, torna-se facilmente compreensível o desejo de utilizar o remanescente do sinal ótico do bombeamento Raman para alimentar eletricamente os elementos de uma rede ótica.

4.2 Caracterização do Conversor Opto-eletrónico

O conversor opto-eletrónico, tipicamente, é construído com base na heterojunção de um material semiconductor, cujas bandas de absorção se situam na região do infravermelho próximo, por exemplo, AlGaAs, GaAs, InGaAs ou InP [34,35]. Como as fibras óticas possuem um valor do diâmetro do núcleo típico compreendido entre os 8 μm e os 65 μm , valores esses muito inferiores à área de exposição de uma célula fotovoltaica tradicional. Assim, para fazer a conversão da radiação luminosa para um sinal elétrico são utilizadas heterojunções de semicondutores de elevada corrente com uma superfície de 1 mm \times 1mm. Para aumentar a diferença de potencial neste tipo de dispositivo as células fotovoltaicas são divididas em várias secções eletricamente isoladas e ligadas entre si em série, quando se pretende aumentar a corrente elétrica estas ligações são feitas em paralelo. Assim, para uma célula de GaAs serão necessárias 6 secções para se obter uma tensão de saída de 6 V [9].

Os parâmetros utilizados para caracterizar o PPC foram o fator de preenchimento, a potência máxima teórica e a eficiência máxima de conversão. O PPC utilizado neste trabalho foi o modelo PPC-9LW da JDSU, cujas fotografias se encontram na figura 4.1. Para fazer a

caracterização deste PPC foi utilizado um laser da Anritsu a emitir com um comprimento de onda centrado em 1470 nm e com uma potência máxima ótica de saída de 24.0 dBm.

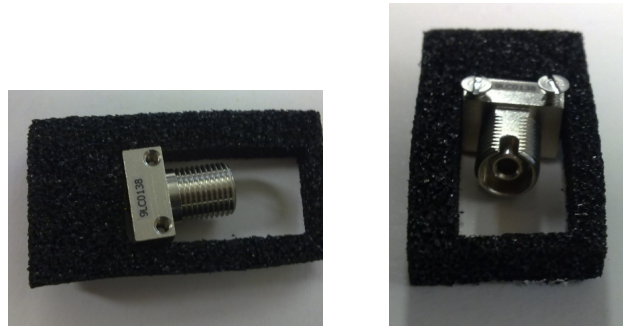


Figura 4.1: Fotografias do PPC utilizado.

A saída elétrica do PPC foi ligada a uma resistência variável, onde a tensão e corrente foram medidas em função da potência ótica do sinal de entrada. Esses resultados podem ser vistos na figura 4.2.

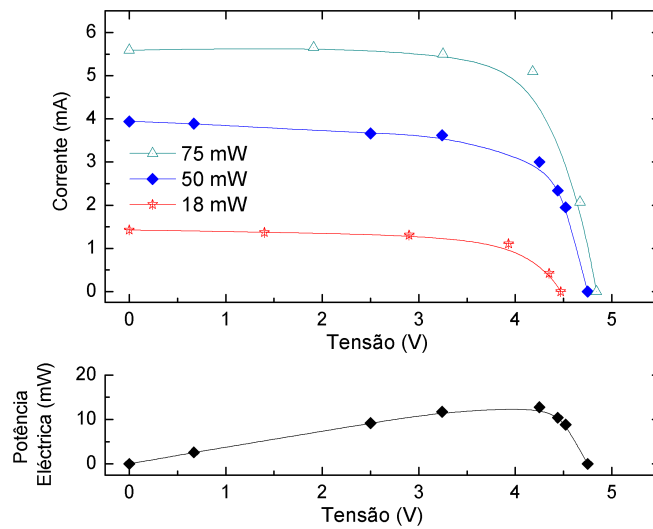


Figura 4.2: Caraterização do PPC: em cima, a curva IV para diversos valores de potência ótica incidente e em baixo, potência elétrica gerada em função da tensão de saída para uma potência ótica incidente de 50 mW.

Para uma potência de incidência de 75 mW obteve-se uma potência de saída máxima teórica de 27.1 mW, correspondendo a uma eficiência de 36.1 %. A potência elétrica máxima efetiva obtida foi de 17.9 mW, o que corresponde a um fator de preenchimento de 0.66, sendo os valores semelhantes para os restantes valores de potência ótica de entrada.

4.3 Reciclagem da potência do sinal de bombeamento

Para demonstrar a possibilidade de utilizar este PPC para reciclar a energia do sinal de bombeamento Raman foi montado o sistema esquematizado na figura 4.3.

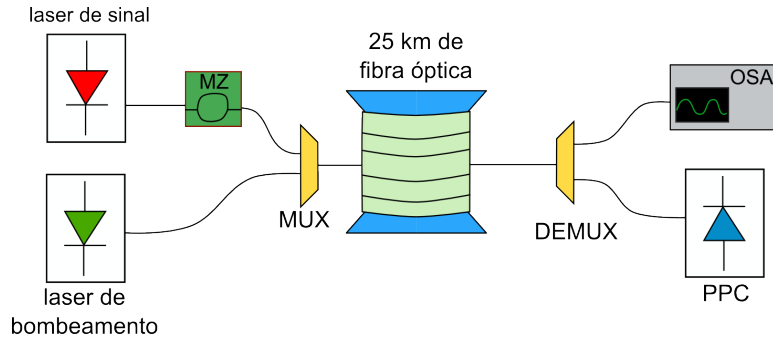


Figura 4.3: Esquema do sistema utilizado para demonstrar a reciclagem da energia do sinal de bombeamento Raman.

Neste sistema o sinal ótico proveniente de um laser Santec (TSL-210V) é modulado externamente por um modulador Mach-Zehnder (MZ) da JDSU a 10 Gbits, com uma sequência de 2^7-1 PRBS, proveniente de um gerador Hewlett Packard (8340B). O sinal ótico é injetado numa bobina de fibra ótica monomodo com 25 km de comprimento, juntamente com este sinal foi injetado um sinal de um laser de elevada potência de bombeamento, com comprimento de onda 1470 nm e uma potência ótica máxima de 24.0 dBm. O espectro ótico medido na entrada da fibra pode ser visto na figura 4.4. Neste espectro é visível a presença do laser Raman como uma banda espectral larga centrada nos 1470 nm, enquanto o sinal ótico de dados é visível como um pico estreito em 1550 nm.

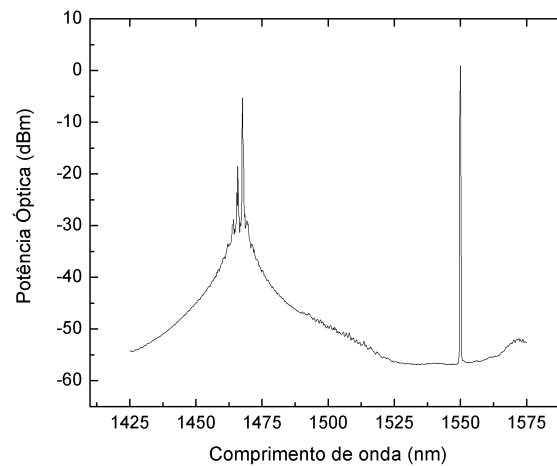


Figura 4.4: Espectro ótico na entrada da fibra ótica.

Após a propagação na fibra o sinal é dividido espectralmente por um demultiplexador, sendo conduzidos, respetivamente, para o PPC a componente centrada em 1470 nm e para o OSA Advantest (Q8384) a componente de sinal ótico centrada em 1550 nm. Variando o comprimento de onda do sinal modulado, determinou-se o ganho do sinal ótico de saída como pode ser observado na imagem 4.5. Como se pode observar, o ganho máximo obtido ocorre para um comprimento de onda de 1580 nm. Correspondendo a uma diferença espectral em relação ao sinal de bombeamento de 13 THz.

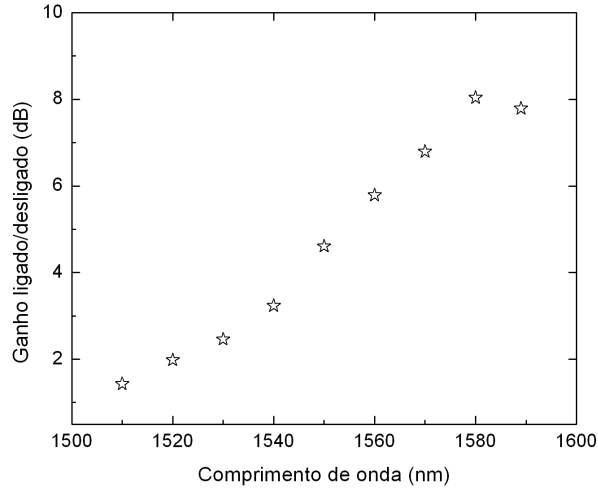


Figura 4.5: Ganho ligado/desligado obtido através da amplificação Raman.

Analisando o ganho obtido (ganho ligado/desligado), para o comprimento de onda do sinal nos 1580 nm, obteve-se um ganho de 8.04 dB para esta situação. Ao utilizar uma tensão à saída de 3.3V, correspondente ao valor comum para a maior parte dos componentes de eletrônica e micro-eletrônica, obteve-se 18.07 mW de potência elétrica.

Este valor é considerado suficientemente elevado para alimentar os circuitos nos NRs das redes óticas onde se requer operações de proteção e restauro do sistema. Na figura 4.6 pode-se ver o diagrama de olho do sinal após a sua saída no demultiplexer tirado por um oscilador digital Hewlett Packard (83480A).

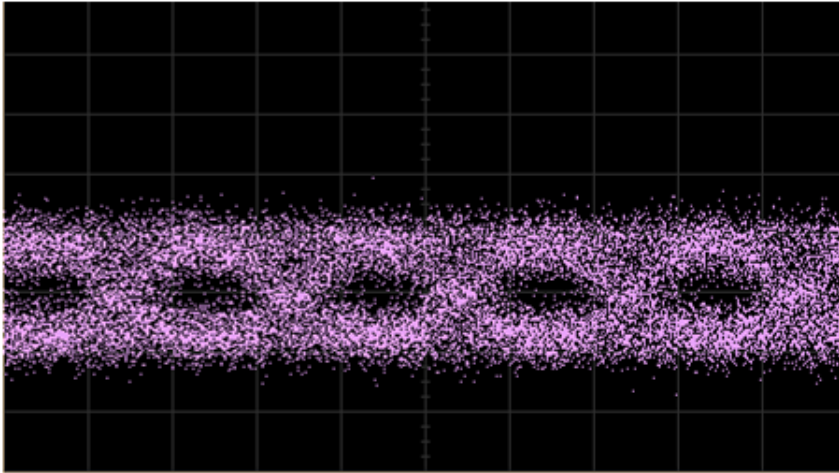


Figura 4.6: Diagrama de olho do sinal após saída no OSA obtido com um osciloscópio digital Hewlett Packard (83480A). A escala vertical é arbitrária e a escala horizontal é de 50 ps/div.

4.4 Conclusões

Neste capítulo foi proposta a reciclagem da potência extra do bombeamento Raman, para a amplificação do sinal em redes PON, para a produção de energia elétrica. Com este propósito foi montado um sistema desse tipo com separação no recetor do sinal e da emissão do laser de bombeamento. Foi conseguido um ganho no sinal de 8 dB nos 25 km de fibra, bem como a geração de 27 mW de energia com uma eficiência de conversão que excede os 35 %.

Desta forma a solução proposta é considerada praticável para alimentar redes PON com componentes de baixo consumo elétrico em NRs para operações de proteção e restauro do sistema [36].

5 Desenvolvimento de um Monitor para o Coeficiente de Estrutura do Índice Refrativo

Como foi mencionado anteriormente, o coeficiente de estrutura do índice refrativo, C_n , é determinante para o conhecimento do comportamento do feixe ótico num ambiente turbulento. Assim, requer-se o desenvolvimento de um medidor para este coeficiente. Com isto em mente foi projetado um sistema que permita efetuar a medição de forma simples, rápida, económica e em tempo real do coeficiente estrutural do índice de refração. A expressão que descreve o deslocamento do feixe, a expressão 2.21, e que se reencontra aqui,

$$\sigma_r^2 = 1,83C_n^2\lambda^{-1/6}L^{17/6} \quad (2.21)$$

foi utilizada para estimar o desvio padrão do feixe em função do regime de turbulência para um percurso de 1 m e um comprimento de onda de 675 nm. Estes valores dão a ordem de grandeza dos resultados esperados.

Tabela 5.1: Valores esperados para σ_r .

Turbulência	C_n (m ^{-1/3})	σ_r (m)
fraca	8×10^{-9}	0.04×10^{-6}
intermédia	4×10^{-8}	0.18×10^{-6}
forte	5×10^{-7}	2.23×10^{-6}

5.1 Implementação

Utilizando um díodo laser de GaAs, cujo comprimento de onda de emissão é 675 nm, e uma *webcam* da marca *Genius*® modelo Express V2, foi projetado um sistema esquematizado na figura 5.1. Este modelo de *webcam* possui uma resolução de 352×288 pixels e consegue tirar 10 imagens por segundo. Neste sistema, o feixe ótico percorre um percurso turbulento, onde sofrerá um deslocamento dependente da turbulência do meio. No detetor o sinal ótico é projetado numa folha de papel branca (60 gr/m²), no outro lado da folha a *webcam* regista a imagem formada na folha de papel. Este detetor encontra-se dentro de uma caixa apenas com uma abertura por onde entra o feixe laser, reduzindo a interferência provocada pela luz ambiente.

Com a utilização do *matlab*® foi escrito um *script* que permitiu fazer a captura de várias imagens da *webcam* sequencialmente e as gravar para posterior análise.

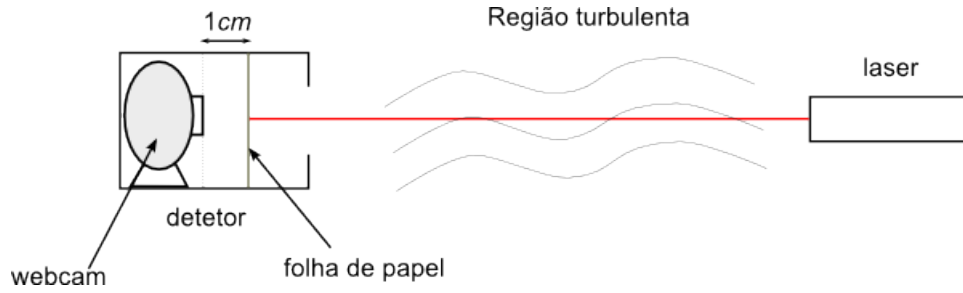


Figura 5.1: Esquema do sensor desenvolvido para determinar o coeficiente de estrutura do índice de refração.

5.2 Resultados

O primeiro passo foi realizar a calibração do sistema, com recurso a uma imagem padrão, tendo-se estimado uma resolução de 248 pixels/cm.

O passo seguinte consistiu na utilização de uma placa de aquecimento circular com 30 cm de diâmetro e com 6 níveis de aquecimento diferentes, que permite gerar turbulência no percurso de propagação do sinal ótico. A captura de imagens é realizada com placa de aquecimento desligada, posteriormente a placa é ligada e após 10 minutos é obtido um conjunto de 1000 imagens para cada um dos 6 níveis de aquecimento. Na figura 5.2 pode-se observar uma imagem obtida pela *webcam* com a placa de aquecimento desligada.

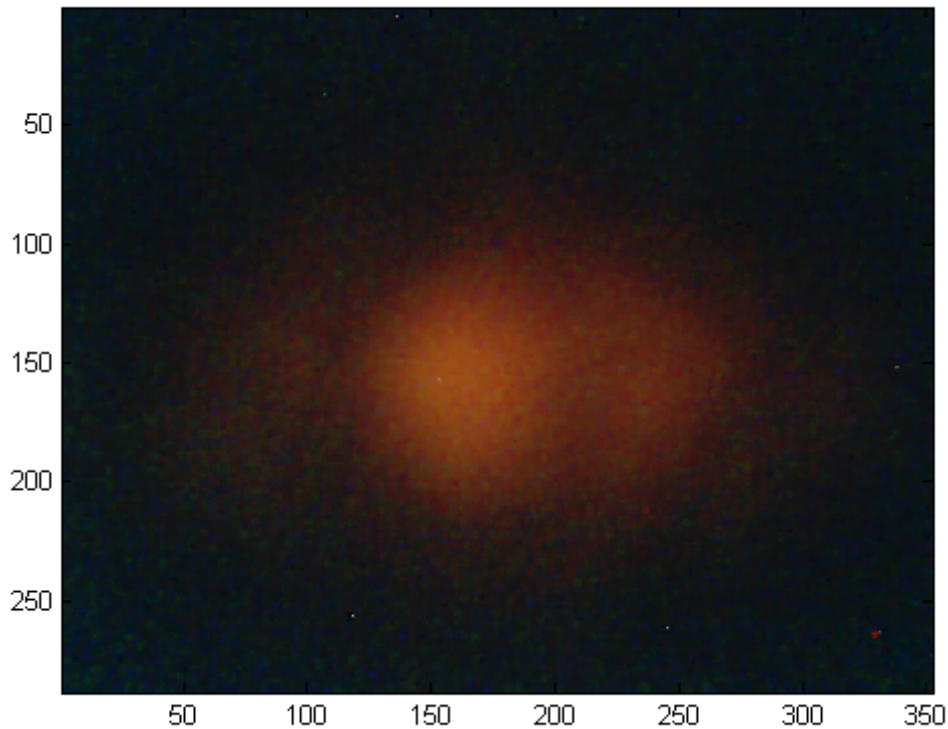


Figura 5.2: Exemplo de imagem obtida com o detector.

Com o *script* de *matlab*[®] faz-se a obtenção de imagens sendo tratadas como 3 matrizes, independentes e com uma intensidade para cada uma das componentes RGB compreendida entre 0 e 255. Estas matrizes são corrigidas por forma a obter uma matriz com o perfil bidimensional do feixe laser. Essa correção consiste em subtrair a matriz correspondente à componente verde à matriz correspondente à componente vermelha, desta forma é reduzida a interferência proveniente da luz ambiente. A partir desta matriz é determinado o perfil do feixe através do valor médio por colunas, de forma a obter um vetor com o perfil segundo o eixo horizontal e o valor médio por linhas de forma a obter um vetor com o perfil segundo o eixo vertical. Estes perfis são ajustados a funções gaussianas, recorrendo à rotina do *matlab*[®] *nlinfit*. Observa-se pela figura 5.2 que o perfil do laser segundo o eixo horizontal possui 3 bandas de emissão, isto deve-se à utilização de um laser semiconductor. Assim, ao fazer este ajuste utilizou-se 3 funções gaussianas das quais só se considera a função central na análise. Os ajustes para os valores obtidos para eixo horizontal e vertical podem ser observados respetivamente na figura 5.3 e 5.4. Como estes ajustes dependem do número de pontos de ajuste é esperado que a utilização de uma *webcam* com maior resolução possibilite a obtenção de melhores ajustes.

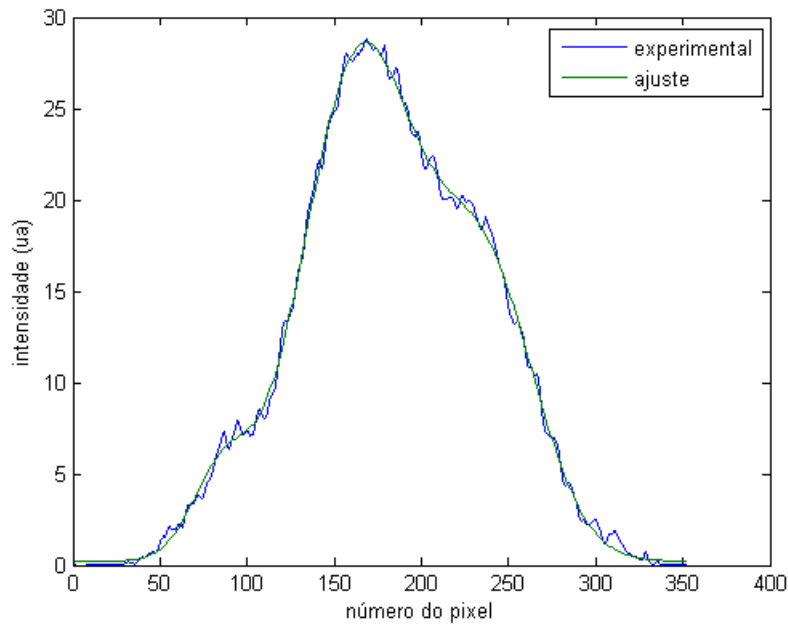


Figura 5.3: Perfil do feixe segundo o eixo horizontal e ajuste gaussiano.

Destes ajustes têm-se interesse na posição central do perfil gaussiano. A distribuição da posição central para 500 pontos pode ser observada na figura 5.5.

A partir desses dados obtêm-se o desvio padrão da posição do feixe, σ_x e σ_y respetivamente para a componente horizontal e para a componente vertical, que estão relacionados com o deslocamento do feixe provocado pela turbulência da seguinte forma:

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (5.1)$$

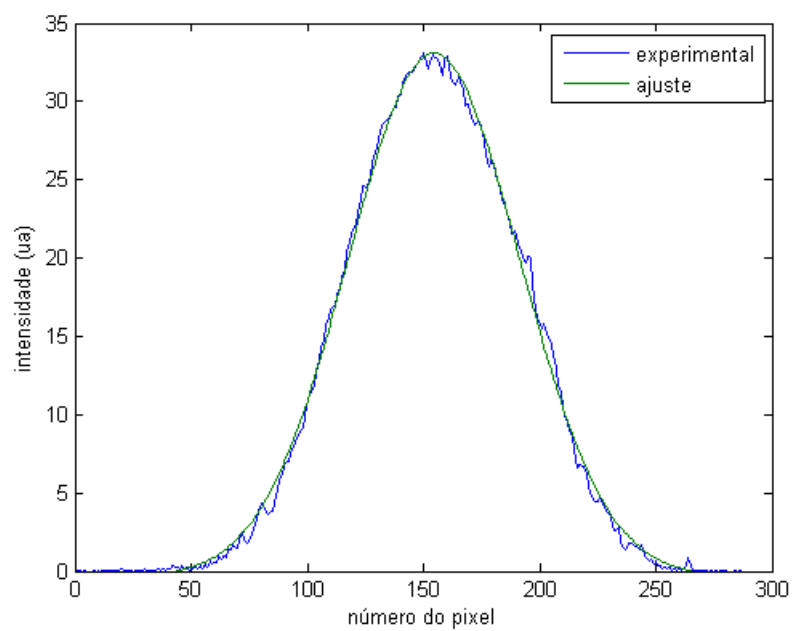


Figura 5.4: Perfil do feixe segundo o eixo vertical e ajuste gaussiano.

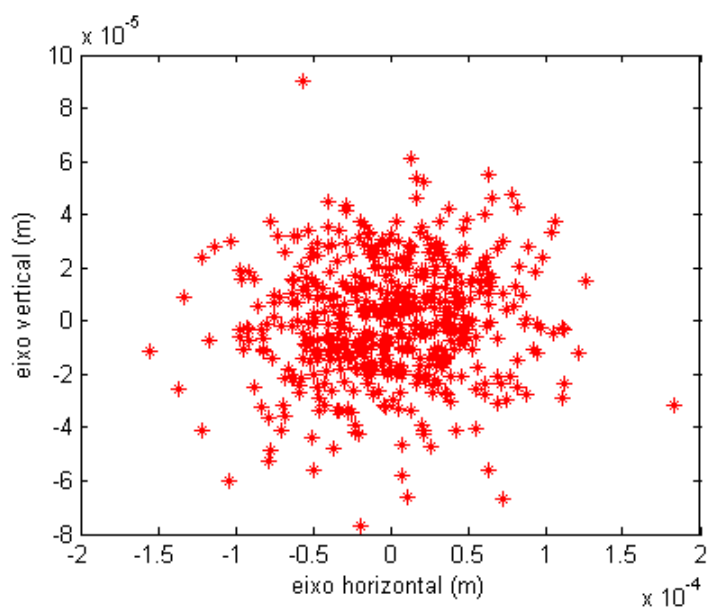


Figura 5.5: Distribuição dos pontos centrais obtidos através do ajuste gaussiano.

Uma questão relevante é determinar o número mínimo de amostras, que permita fazer a implementação deste sistema em tempo real. Se forem utilizadas demasiadas amostras o sistema perde a capacidade de resposta a alterações rápidas de turbulência e se forem poucas amostras o sistema perde consistência e fiabilidade. Ao analisar a evolução do desvio padrão, σ_r , com o número de amostras, figura 5.6, observa-se uma rápida convergência em cada nível de turbulência após 500 amostras. Para alguns valores nota-se a existência de desvios do valor de σ_r após 500 amostras, este facto deve-se a ligeiros desvios da *webcam* ou do laser que altera o ponto central médio de incidência. Estes valores foram obtidos utilizando uma distância de propagação de 2,3 m.

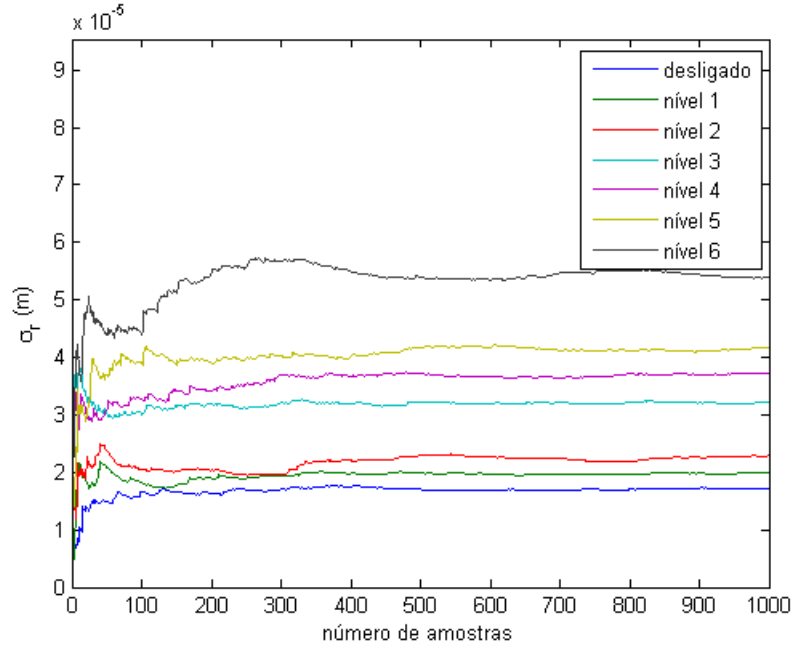


Figura 5.6: Evolução do desvio padrão estimado da posição do feixe em função do número de amostras e para diversos níveis de turbulência.

Considerando que este sistema possui um erro associado a cada medição que aumenta o σ_r medido, tal que, o σ_r real seja dado por:

$$\sigma_{real} = \sigma_{estimado} - \sigma_{constante} \quad (5.2)$$

em $\sigma_{estimado}$ é o valor obtido diretamente a partir dos dados experimentais e $\sigma_{constante}$ é um erro constante acrescentado pelo sistema de monitorização. Assim, forçando σ_r com a placa desligada a ser igual ao valor para o qual C_n obtido é igual ao valor típico para turbulência fraca foi obtido o valor de $\sigma_{constante} = 1.69 \times 10^{-5}$ m. Este valor foi então aplicado a equação (5.2) de forma a obter os valores do coeficiente estrutural do índice de refração presentes na figura 5.7.

Na figura 5.7 com os valores de C_n obtidos para cada nível de turbulência, calculados através da equação (2.21), é observável um aumento de C_n com o aumento da turbulência induzida. Os valores a partir do 4º nível de turbulência ultrapassam o valor de turbulência forte típico, no entanto, é necessário ter em consideração que a turbulência induzida no espaço de propagação é superior a turbulência numa situação típica em espaço aberto.

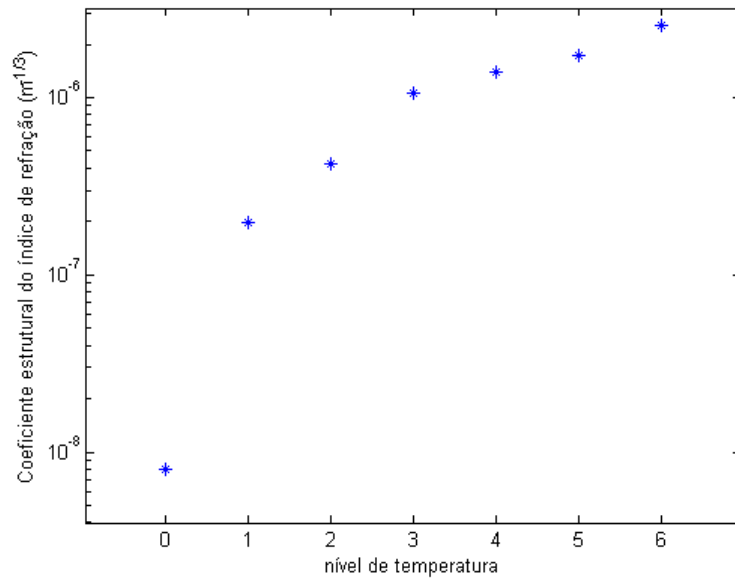


Figura 5.7: Evolução de coeficiente estrutural do índice de refração em função do nível da turbulência induzida.

5.3 Conclusões

Neste capítulo foi proposto e implementado um sistema para monitorizar o coeficiente de estrutura do índice refrativo, C_n , de forma simples, rápida, económica e em tempo real. A obtenção de uma relação entre o aumento de C_n com o aumento da turbulência induzida mostra que o conceito deste monitor é viável. Este sistema permitiu determinar valor para o coeficiente estrutural do índice de refração entre 8×10^{-9} e 2.6×10^{-6} .

6 Conclusões e trabalho futuro

Ao longo do presente trabalho foi efetuado um estudo sobre a transmissão de energia por sinal ótico tanto por espaço livre como por fibra ótica.

Para fazer o estudo da transmissão por espaço livre caracterizou-se de duas células fotovoltaicas comerciais disponíveis. Nessa caracterização foi possível obter eficiências máximas de conversão de 6.9% e 6.5% com fator de preenchimento de 63.2% e 48.7% respectivamente para a célula 1 e para a célula 2.

Posteriormente implementou-se um simulador para a propagação de feixes óticos num meio turbulento. Assim, considerando que a eficiência de máxima de transmissão para estas células é respectivamente 37.4 % e 65.6% e que a fonte do sinal ótico tem uma eficiência de 57 % [19], então um sistema que utilize estas células teria uma eficiência máxima de 1.5 % e 2.5 % respectivamente. No entanto, considerando que há perdas de atenuação e turbulência no meio propagado, essas eficiências, só por si já são consideradas reduzidas, serão ainda mais reduzidas. Nestas simulações foi procurada a forma de obter melhor eficiência na transmissão do feixe ótico pelo espaço livre sujeito a vários tipos de atenuação e ainda à turbulência. Destas simulações foi ainda possível retirar que para pequenas distâncias e/ou valores de C_n é mais eficiente utilizar um feixe homogêneo, mas quando estes valores aumentam torna-se mais eficiente utilizar um feixe gaussiano. Um aspeto demonstrado desta forma foi que para obter maior eficiência com o aumento da turbulência e/ou da distância a percorrer se deve aumentar o alargamento do feixe ótico.

O estudo da propagação em fibra deste trabalho consistiu no estudo da reciclagem da potência extra do bombeamento Raman, na amplificação de sinais em redes PON, para a produção de energia elétrica. No sistema montado para esse fim foi possível obter um ganho de 8 dB por amplificação Raman do sinal e ainda a geração de 27 mW de energia elétrica. Assim, esta parte do trabalho conseguiu cumprir com os objetivos a que foi proposta.

Por fim, foi desenvolvido um sistema de monitorização do coeficiente estrutural do índice de refração, C_n . Durante os testes desenvolvidos o sistema mostrou valores que aumentavam com o aumentar da turbulência o que revela o conceito utilizado para este detetor como sendo válido. Este sistema permitiu determinar valores para o coeficiente estrutural do índice de refração entre 8×10^{-9} e 2.6×10^{-6} .

Como trabalho futuro sugere-se, o desenvolvimento de um modelo para propagação em espaço aberto que consiga relacionar o raio e formato do feixe ótico com a distância percorrida, e a turbulência atmosférica de forma a obter a melhor eficiência de transmissão possível caso a caso. Sugere-se ainda a reimplementação do sistema utilizado para monitorização do coeficiente estrutural do índice de refração com uma *webcam* com maior resolução e maior número de frames por segundo e de um laser com um perfil gaussiano melhor definido.

Referências

- [1] R.J. Forbes. *Studies in Ancient Technology: Ancient geology ; Ancient mining and quarrying ; Ancient mining techniques*. Studies in Ancient Technology Series. Brill Academic Pub, 1966.
- [2] Mário Ferreira. *Óptica e Fotônica*. Lidel, 2003.
- [3] Copper price charts. <http://www.metalprices.com/>, acedido em 26 de Abril de 2012.
- [4] C. N. Vittitoe. Did high-altitude emp cause the Hawaiian streetlight incident? *System Design and Assessment Notes*, 1989.
- [5] Power-over-fibre drives remote data exchange. <http://optics.org/article/25151>, acedido em 20 de Setembro de 2011, jun 2006.
- [6] T. J. Nugent and J. T. Kare. Laser power for uavs. *LaserMotive White Papers*, March 2010.
- [7] W. Freude, *et al.* Energy-autarkic monitor for fttx networks. In *OSA/ANIC*, Toronto, Canada, 2010.
- [8] G. M. T. Beleffi, *et al.* Remotely power assisted optical network terminals in gigabit ethernet passive optical access scenarios. In *OSA ANIC/SOLED*, Karlsruhe, Germany, 2010.
- [9] J.-G. Werthen. Powering next generation networks by laser light over fiber. In *OFC/NOEC*, San Diego, California, EUA, 2008.
- [10] X. Xu, *et al.* Optically powered communication system with distributed Raman amplifier. In *15th OptoElectronics and Communications Conference - OECC*, Sapporo, Japão, 2010.
- [11] P.S. André, *et al.* Raman amplified access networks with pump signal recycling for electrical power conversion. *Microwave and Optical Technology Letters*, 54(1):116–119, 2012.
- [12] Beamed laser power for uavs. <http://www.nasa.gov/centers/dryden/news/FactSheets/FS-087-DFRC.html>, acedido em 20 de Setembro de 2011.
- [13] J. Hecht. Laser-powered helicopter hovers for hours. <http://www.newscientist.com/article/dn19389-laserpowered-helicopter-hovers-for-hours.html>, acedido em 20 de Setembro de 2011.
- [14] D. Wake, *et al.* Optically powered remote units for radio-over-fiber systems. *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, 26:2484–2491, 2008.
- [15] D. Wake, *et al.* An optically powered radio over fiber remote unit using wavelength division multiplexing. In *Microwave Photonics / Asia-Pacific Microwave Photonics Conference - MWP/APMP*, Gold Coast, Queensland, Australia, 2008.
- [16] D. Wake, *et al.* Optical powering of remote units for radio over fiber links. In *Microwave Photonics, IEEE International Topical Meeting*, Victoria, British Columbia, Canada, 2007.
- [17] J N Mitchell and Tx San Antonio. Limits of electrical power generation by transmission of light through optical fibers. *srvtbappliedphysicssuriedu*.
- [18] J. Hecht. *The Laser Guidebook*. Optical and electro-optical engineering series. McGraw-Hill, 1999.
- [19] M Grabherr, *et al.* Efficient single-mode oxide-confined gaas vcsel's emitting in the 850-nm wavelength regime. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 9(10):1304 –1306, oct. 1997.
- [20] M.F. Ferreira. *Nonlinear Effects in Optical Fibers*. Wiley-OSA Series on Optical Communication. John Wiley & Sons, 2011.
- [21] D.R. Goff, *et al.* *Fiber optic video transmission: the complete guide*. Focal Press, 2003.

- [22] L. ELTERMAN. Uv, visible, and ir attenuation for altitudes to 50 km, 1968. *ENVIRONMENTAL RESEARCH PAPERS*, (285), Abril 1968.
- [23] Isaac I. Kim, Bruce McArthur, and Eric J. Korevaar. Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications. volume 4214, pages 26–37. SPIE, 2001.
- [24] Martin Grabner and Vaclav Kvicera. The wavelength dependent model of extinction in fog and haze for free space optical communication. *OPTICS EXPRES*, 19(4), 2011.
- [25] Recommendation itu-r p.1814 prediction methods required for the design of terrestrial free-space optical links. <http://webs.uvigo.es/servicios/biblioteca/uit/rec/P/R-REC-P.1814-0-200708-I!!PDF-E.pdf>, acedido em 12 de Junho de 2012.
- [26] Hugo Weichel. *Laser Beam Propagation in the Atmosphere*. SPIE Publications, 1990.
- [27] Zhao Junwei, *et al.* Measurement of atmospheric refractive index structure constant near ground based on can bus. In *Electronic Measurement Instruments (ICEMI), 2011 10th International Conference on*, volume 2, pages 270 –273, aug. 2011.
- [28] I. Overington. *Vision and acquisition: fundamentals of human visual performance, environmental influences, and applications in instrumental optics*. Pentech Press, 1976.
- [29] L.C. Andrews, *et al.* *Laser beam scintillation with applications*. SPIE Press monograph. SPIE Press, 2001.
- [30] F. Gutmann, *et al.* *Organic semiconductors*. Number pt. 2 in Organic Semiconductors. R.E. Krieger Pub. Co., 1983.
- [31] Xiamen mars rock science technology co., ltd. <http://marsrock.en.alibaba.com/>, acedido em 20 de Maio de 2012.
- [32] G.A. Landis. Space power by ground-based laser illumination. *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE*, 6(11):3 –7, nov. 1991.
- [33] B. Zhu and D. Nasset. Gpon reach extension to 60 km with entirely passive fibre plant using Raman amplification. In *ECOC*, Viena, Austria, 2009.
- [34] A. Luque and S. Hegedus. *Handbook of Photovoltaic Science and Engeneering*. West Sussex, 2003.
- [35] V. Andreev, *et al.* High current density GaAs and GaSb photovoltaic cells for laser power beaming. In *Proc. 3rd World Conf. Photovoltaic Energy Conversion*, Osaka, Japan, 2003.
- [36] K. Takeda, M. Takenaka, T. Tanemura, and Y. Nakano. Design and fabrication of mach-zehnder interferometer bistable laser diode all-optical flip-flop. In *Photonics in Switching, 2009. PS '09. International Conference on*, pages 1 –2, sept. 2009.